

TEXTE

178/2020

ILESA - Edel- und sondermetallhaltige Abfallströme intelligent lenken: Bündelung, Zwischenlagerung, Rückgewinnungsgrad

Abschlussbericht

TEXTE 178/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 33 316 0
FB000223

ILESA - Edel- und sondermetallhaltige Abfallströme intelligent lenken: Bündelung, Zwischenlagerung, Rückgewinnungsgrad

Abschlussbericht

von

Dr. Siegfried Kreibe, Ruth Berkmüller, Andreas Förster, René Peche,
Birgit Reinelt
bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg

Prof. Dr. Michael Krupp
Forschungsgruppe HSAOps an der Hochschule Augsburg, Augsburg


Dr. Sonja Röder, Matthias Schleifenbaum
Avocado Rechtsanwälte, Köln

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

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Abschlussdatum:

November 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Produktverantwortung
Regina Kohlmeyer

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2020

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

Kurzbeschreibung

Sondermetalle wie Neodym und weitere Seltenerdmetalle, Indium oder Tantal werden in Deutschland heute nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maße aus Post-Consumer-Abfällen zurückgewonnen. Dies liegt zum Teil daran, dass viele der Produkte, die solche Metalle enthalten, noch nicht lange auf dem Markt sind, so dass sowohl der Aufbau von großtechnischen Recyclingverfahren noch nicht erfolgt ist als auch die Rücklaufmengen noch zu gering sind. Für die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Abfällen gibt es zwar seit vielen Jahren bewährte Verfahren, eine Herausforderung stellt jedoch ihre effiziente Erfassung und Separation auch aus gering konzentrierten Abfallströmen aus einer Vielzahl kleiner Anfallstellen dar. Die Konzentration bzw. die Menge an Edel- und Sondermetallen in Altprodukten oder Bauteilen ist zudem häufig so gering, dass ihre Erfassung oder Separation aus den Abfallströmen aktuell nicht wirtschaftlich ist.

Die Untersuchung befasste sich schwerpunktmäßig mit den Abfallströmen NdFeB-Magnete, Fahrzeugelektronik, edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren, cer- und lanthanhaltige Abfallströme, seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe, indiumhaltige LCD-Schichten und Tantalkondensatoren.

Für diese Abfallströme wurde untersucht, wie neuartige Logistikkonzepte und Ansätze zur intelligenten Organisation sowie zur Gestaltung von Material- und Informationsflüssen das Recycling verbessern können. Es wurden technische, organisatorische und rechtliche Möglichkeiten zur längerfristigen Zwischenlagerung solcher Abfälle bis großtechnische Recyclingverfahren verfügbar sind, konkretisiert und geprüft. Schließlich wurden Wege zur Abschätzung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades erarbeitet und Maßnahmenvorschläge zur Erzielung von mehr Recycling entwickelt und bewertet.

Abstract

Special metals such as neodymium and other rare earth metals, indium or tantalum are not recovered at all from post-consumer waste or only to a limited extent. This is partly due to the fact that many of the products containing such metals have not been on the market for long, so that both the development of large-scale recycling processes has not yet taken place and the return volumes are still too low. For the recovery of precious metals from waste, proven processes have been available for many years. However, their efficient collection and separation, even from low-concentration waste streams from a large number of small sources, poses a challenge. Moreover, the concentration or quantity of precious and special metals in waste products or components is often so low that their collection or separation from the waste streams currently is not profitable.

The investigation focused on the waste streams NdFeB magnets, vehicle electronics, precious metal-containing environmental catalysts, cerium- and lanthanum-containing waste streams, rare earth metal-containing phosphors, indium-containing LCD layers and tantalum capacitors.

For these waste streams, it was investigated how novel logistics concepts and approaches to intelligent organisation and the design of material and information flows can improve the recycling. Technical, organizational, and legal possibilities for the longer-term interim storage of such waste, until large-scale recycling capacities are available, were specified and examined. Finally, ways to estimate an environmentally optimal recovery rate were developed and proposals for measures to achieve more recycling were developed and evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	23
Zusammenfassung.....	25
Summary.....	46
1 Einleitung	66
2 Bündelung von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen.....	68
2.1 Identifizierung der Abfallströme zur Bündelung und Zwischenlagerung	68
2.1.1 Vorgehen bei der Bewertung	68
2.1.1.1 Kriterium A: Wert Konzentration	68
2.1.1.2 Kriterium B: Mengenpotenzial Deutschland	70
2.1.1.3 Kriterium C: Separationsaufwand im Verhältnis zum Wertpotenzial	70
2.1.1.4 Kriterium D: Verwertungsprozess	70
2.1.1.5 Kriterium E: Informationslage	71
2.1.1.6 Kriterium F: Erfassungs- und Bündelungssystem	71
2.1.1.7 Bewertung der Abfallströme	71
2.1.2 Bewertung Edelmetalle	73
2.1.2.1 Silber [Ag]	73
2.1.2.2 Gold [Au]	74
2.1.2.3 Palladium [Pd]	75
2.1.2.4 Platin [Pt]	75
2.1.3 Bewertung Sondermetalle	77
2.1.3.1 Gallium [Ga]	77
2.1.3.2 Germanium [Ge]	78
2.1.3.3 Indium [In]	79
2.1.3.4 Tantal [Ta]	80
2.1.3.5 Cer [Ce]	81
2.1.3.6 Lanthan [La]	82
2.1.3.7 Seltenerdmetalle (nur Neodym [Nd], Dysprosium [Dy] und Praseodym [Pr])	84
2.1.3.8 Weitere SEE	85
2.1.4 Relevante Anwendungsgebiete und ihre Elemente.....	86
2.2 Grundlagen der Erfassungslogistikkonzepte und Gestaltung der Informationsflüsse zur Bündelung und Behandlung von Abfällen	89

2.2.1	Basis der Ausarbeitungen – Verständnis und Effizienzprinzipien im Logistikmanagement	89
2.2.2	Ausgangssituation als Knoten-Kantenmodell edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme	92
2.2.3	Ein generisches Modell logistischer Herausforderungen in der Recycling-Kette edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme	95
2.2.3.1	Sammelstellen	96
2.2.3.2	Sortierung und Demontage	100
2.2.3.3	Rückgewinnung („Produktion“)	103
2.2.3.4	Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion	104
2.2.4	Ein generisches Modell logistischer Lösungsansätze in der Recycling-Kette.....	105
2.2.4.1	Sammelstelle	107
2.2.4.2	Sortierung und Demontage	111
2.2.4.3	Rückgewinnung („Produktion“ von Sekundärrohstoffen)	117
2.2.4.4	Lösungen für Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion auch nach SCM - Ansätzen	118
2.2.5	Informationsbedarf und -übermittlung	122
2.2.5.1	Informationsbedarf	122
2.2.5.2	Informationsübermittlung: Beispiele zu vorhandenen Ansätzen	123
2.2.5.3	Informationsverarbeitung und -bereitstellung in der Abfallwirtschaft	126
2.3	Rechtliche Aspekte der Ausbau-, Verwertungs- und Kennzeichnungspflichten und der Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen für edel- und sondermetallhaltige Abfallströme	130
2.3.1	Einleitung und rechtliche Fragestellung.....	130
2.3.2	Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle, die dem ElektroG unterfallen	130
2.3.2.1	Anwendungsbereich des ElektroG	130
2.3.2.2	Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung	133
2.3.2.3	Pflicht zur Erstbehandlung, insbesondere zur Separation von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aus Elektroaltgeräten	135
2.3.2.4	Handlungsoption des Gesetz- oder Verordnungsgebers zur Verankerung verbindlicher Verwertungsquoten für Edel- und Sondermetalle aus Elektroaltgeräten	137
2.3.2.5	Kennzeichnungspflichten	140
2.3.2.6	Behandlungs- und Demontagehinweise	141
2.3.2.7	Ergänzende Hinweise zu spezifischen Pflichten bezüglich NdFeB-Magnethaltiger Elektro- und Elektronikgeräte oder Motoren bzw. der NdFeB-Magnete selbst	142
2.3.3	Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle, die der AltfahrzeugV unterfallen	143

2.3.3.1	Demontagepflichten	143
2.3.3.2	Verwertungsquoten	144
2.3.3.3	Kennzeichnung	146
2.3.3.4	Demontagehinweise	146
2.3.4	Allgemeine abfallrechtliche Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle	147
2.3.5	Regelungen zur Kennzeichnung und zu Demontagehinweise in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.....	148
2.3.5.1	Formelle Anforderungen an Durchführungsmaßnahmen	149
2.3.5.2	Materielle Anforderungen an Durchführungsmaßnahmen	150
2.3.6	Zusammenfassung der rechtlichen Aspekte zu den Ausbaupflichten, der Sicherstellung von Verwertungsquoten, den Kennzeichnungspflichten und der Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen für edel- und sondermetallhaltige Abfallströme	152
2.4	Die edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme: Verwertungsprozesse, Bündelungs- und Informationskonzepte	154
2.4.1	Vorbemerkung	154
2.4.2	Abfallstromübergreifende Empfehlungen zu Informationsverarbeitung und -bereitstellung	156
2.4.2.1	Recycling-Warenwirtschaftssystem (RWWS)	156
2.4.2.2	Füllstanderfassung	157
2.4.2.3	Stoffstromübergreifende Bündelung	158
2.4.2.4	Bündelungs-Workshops	160
2.4.2.5	Diskussion der grundlegenden Prozessveränderungen	161
2.4.3	Seltenerdmetallhaltige separierte Magnetwerkstoffe	163
2.4.3.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	163
2.4.3.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	167
2.4.3.3	Prozessketten- und Bündelungskonzept	169
2.4.3.4	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	171
2.4.3.5	Bündelungsebene und Motivationslage	177
2.4.3.6	Informationsbedarf	179
2.4.3.7	Szenario für ein mögliches marktgetriebenes Erfassungs- und Bündelungskonzept	183
2.4.3.8	Regulatorische Maßnahmenoptionen	184
2.4.3.9	Nicht regulatorische Maßnahmenoptionen für eine effizientere Logistik	187
2.4.4	Edelmetallhaltige separierte Leiterplatten, Sensoren und Zündkerzen aus Altfahrzeugen	189
2.4.4.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	189

2.4.4.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	191
2.4.4.3	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	194
2.4.4.4	Bündelungsebene und Motivationslage	196
2.4.4.5	Informationsbedarf	197
2.4.4.6	Szenario für ein mögliches marktgetriebenes Bündelungskonzept	200
2.4.4.7	Regulatorische Maßnahmenoptionen	201
2.4.4.8	Nicht regulatorische Maßnahmenoptionen für eine effizientere Logistik	202
2.4.5	Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren.....	203
2.4.5.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	203
2.4.5.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	204
2.4.5.3	Bündelungskonzept	205
2.4.5.4	Maßnahmenoptionen	206
2.4.6	Cer- und lanthanhaltige Abfallströme.....	207
2.4.6.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	207
2.4.6.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	211
2.4.6.3	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	215
2.4.6.4	Bündelungskonzept	218
2.4.6.5	Maßnahmenoptionen	219
2.4.7	Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe.....	219
2.4.7.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	219
2.4.7.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	224
2.4.7.3	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	227
2.4.7.4	Bündelungskonzept	229
2.4.7.5	Maßnahmenoptionen	229
2.4.8	Separierte indiumhaltige LCD-Schichten.....	230
2.4.8.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	230
2.4.8.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	231
2.4.8.3	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	231
2.4.8.4	Bündelungskonzept	232
2.4.8.5	Maßnahmenoptionen	233
2.4.9	Separierte Tantalkondensatoren	233
2.4.9.1	Abfallströme und Ist-Prozesse	233
2.4.9.2	Technische Ziel-Verwertungsketten	235
2.4.9.3	Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme	235
2.4.9.4	Bündelungskonzept	236
2.4.9.5	Maßnahmenoptionen	237

3	Zwischenlagerung bis Recyclingtechnik verfügbar ist	238
3.1	Auswahl geeigneter Sondermetalle und Abfallströme.....	238
3.2	Recyclingverfahren	246
3.2.1	Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete.....	246
3.2.1.1	Abtrennung der NdFeB-Magnete aus dem Abfallstrom	247
3.2.1.2	Verwertungsverfahren	248
3.2.2	Recyclingverfahren für cer-/lanthanhaltige Abfallströme	250
3.2.2.1	Poliermittel	251
3.2.2.2	NiMH-Batterien	253
3.2.2.3	Spezialgläser	254
3.2.2.4	FCC-Katalysatoren	254
3.2.2.5	KFZ-Katalysatoren (Quelle: Steinlechner, Antrekowitsch, 2015)	254
3.2.3	Recyclingverfahren für indiumhaltige Abfallströme	255
3.2.4	Recyclingverfahren für Leuchtstoffe	257
3.2.5	Zeitbedarf für den Aufbau von Verwertungslösungen	258
3.3	Lagergestaltung	260
3.3.1	Allgemeine Anforderungen an Abfallzwischenlager.....	260
3.3.2	Organisatorische Randbedingungen der Lagerung.....	262
3.3.3	Lagerung zur Rohstoffbevorratung	263
3.3.4	NdFeB-Magnete	265
3.3.4.1	Geeigneter Grad der Separation	265
3.3.4.2	Geeignete Einlagerungsform	267
3.3.4.3	Anforderungen an NdFeB-Magnete für die Zwischenlagerung	268
3.3.4.4	Gestaltung des Zwischenlagers für NdFeB-Magnete	269
3.3.5	Cer-/lanthanhaltige Abfälle: Poliermittel.....	271
3.3.5.1	Geeigneter Grad der Separation	271
3.3.5.2	Geeignete Einlagerungsform	272
3.3.5.3	Anforderungen an Poliermittel für die Zwischenlagerung	272
3.3.5.4	Gestaltung des Zwischenlagers für Poliermittel	273
3.3.6	Indiumhaltige Abfälle: separierte indiumhaltige Glasfraktion.....	274
3.3.6.1	Geeigneter Grad der Separation	274
3.3.6.2	Einlagerungsform	274
3.3.6.3	Anforderungen an separierte indiumhaltige Glasfraktion für die Zwischenlagerung	274
3.3.6.4	Gestaltung des Zwischenlagers für indiumhaltige Glasfraktion	275
3.3.7	Leuchtstoffe	276

3.3.7.1	Geeigneter Grad der Separation	276
3.3.7.2	Geeignete Einlagerungsform	276
3.3.7.3	Anforderungen an Leuchtstoffe für die Zwischenlagerung	277
3.3.7.4	Gestaltung des Zwischenlagers für Leuchtstoffe	277
3.4	Alternativen zur Zwischenlagerung: großtechnisch betriebene Recyclingverfahren im Ausland	278
3.4.1	NdFeB-Magnete	278
3.4.2	Poliermittel.....	278
3.4.3	NiMH-Batterien	279
3.4.4	Spezialgläser und Keramiken	279
3.4.5	FCC-Katalysatoren	279
3.4.6	Kfz-Katalysatoren	279
3.4.7	Indiumhaltige Abfallströme	279
3.4.8	Leuchtstoffe	279
3.5	Rechtliche Randbedingungen der Zwischenlagerung.....	280
3.5.1	Einleitung.....	280
3.5.2	Rechtliche Würdigung	280
3.5.2.1	Rechtliche Anforderungen an die Genehmigung der Zwischenlagerung	280
3.5.2.2	Nachweis der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung oder gemeinwohlverträglichen Beseitigung bei Langzeitlagern nach DepV	292
3.5.2.3	Haftung des Betreibers von Zwischenlagern	301
3.5.2.4	Zwischenlagerung von Sondermetallen (aus Abfällen) aus Gründen der Rohstoffsicherung durch Wirtschaftsbeteiligte oder den Staat	304
3.5.2.5	Ausgestaltung der Zwischenlagerung (Betreiber, Finanzierung)	307
3.5.2.6	Keine Andienungspflicht für edel- und sondermetallhaltige Abfälle	312
3.5.2.7	Keine Pflicht zur Separation, Zwischenlagerung und Verwertung sondermetallhaltiger Fraktionen aus ElektroG oder AltfahrzeugV	313
3.5.3	Zusammenfassung des rechtlichen Änderungsbedarfs	313
3.6	Bewertung der Optionen und Alternativen zur Zwischenlagerung.....	315
3.6.1	Zeitlicher Ablauf von Einlagerung und Auslagerung	315
3.6.2	Kostenfaktoren der Zwischenlagerung	316
4	Ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad von Edel- und Sondermetallen.....	319
4.1	Bewertung ökologischer Aufwand.....	319
4.1.1	Erläuterung an einem Beispiel	326
4.2	Wege zum optimalen Rückgewinnungsgrad – die Bewertungsmethode.....	332
4.2.1	Typologie Maßnahmenoptionen.....	334

4.2.2	Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen: Kriterien und Attributsausprägungen	338
4.2.3	Ausgangsdaten für die quantitative Bewertung der ermittelten Rückgewinnungsgrade	344
4.2.4	Vorstellung der Funktionsweise des Tabellenkalkulations-Tools am Beispiel eines Abfallstroms mit einer Teilmenge (edelmetallhaltige Leiterplatten aus Altfahrzeugen)	346
4.2.5	Vorstellung der Funktionsweise des Tabellenkalkulations-Tools am Beispiel eines Abfallstroms mit drei Teilmengen (NdFeB-Magnete)	355
4.2.5.1	Teilmenge 1: Magnete aus Industriemotoren	356
4.2.5.2	Teilmenge 2: Magnete aus IT (Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher)	362
4.2.5.3	Teilmenge 3: Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw	367
4.2.5.4	Gesamtergebnis	372
5	Implementierung der Maßnahmen zur Stärkung des Recyclings von Edel- und Sondermetallen	374
5.1	Vorbemerkungen	374
5.2	Seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe	375
5.3	Edelmetallhaltige Leiterplatten und Lambdasonden aus Altfahrzeugen	378
5.4	Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren	380
5.5	Cer- und lanthanhaltige Abfallströme	380
5.6	Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe	381
5.7	Separierte indiumhaltige LCD-Schichten	381
5.8	Separierte Tantalkondensatoren	383
5.9	Übergeordnete Maßnahmen zur Logistik und Bündelung	383
5.10	Angemessenheit von Maßnahmen	384
6	Quellenverzeichnis.....	389
7	Anhang	396

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Grobes Prozesskettenkonzept zur Bündelung und Aufbereitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen; blaue Rahmen: derzeit mengenmäßig dominante Abfallströme; rote Rahmen: stark wachsende Mengenströme	29
Abbildung 2:	Bündelungspotenziale ausgewählter Stoffströme.	43
Abbildung 3:	Brutto-Umweltentlastungspotenzial der Zielmetalle in den betrachteten Abfallströmen durch Verzicht auf ihre Primärproduktion; dargestellt anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen (Angaben in Einwohnerwerten); Carbon Footprint Einwohnerwerte Deutschland: 11,4 t CO ₂ eq/a (Quelle: Umweltbundesamt 2018); Carbon Footprint Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).	44
Abbildung 4:	Wert nach Neuwarenpreis für verschiedene Konzentrationen der Zielelemente	69
Abbildung 5:	Generische logistische Situation und Prozessschritte in der Entsorgungslogistik; Quelle: eigene Darstellung	94
Abbildung 6:	Verkettung und Herausforderung von Last Mile der Auslieferung mit First Mile der Sammellogistik; Quelle: Eigene Darstellung.....	97
Abbildung 7:	Bündelungspotenziale ausgewählter Stoffströme.	161
Abbildung 8:	Gesamtmenge im Einzelgerät in kg/Stück über das Gesamtpotential an Magnetmaterial in Deutschland im Jahr 2020 in t/a	165
Abbildung 9:	Grobes Prozesskettenkonzept zur Bündelung und Aufbereitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen; blaue Rahmen: derzeit mengenmäßig dominante Abfallströme; rote Rahmen: stark wachsende Mengenströme	169
Abbildung 10:	Leiterplatten aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.	193
Abbildung 11:	Lambdasonden aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	194
Abbildung 12:	Umweltkatalysatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.	205
Abbildung 13:	Schleif- und Poliermittel - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.	212
Abbildung 14:	FCC-Katalysatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	213

Abbildung 15:	Katalysatoren aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	214
Abbildung 16:	Ni(MH)Batterien - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	215
Abbildung 17:	Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	225
Abbildung 18:	Leuchtstoffe aus CRT-Geräten - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.	226
Abbildung 19:	Leuchtstoffe aus LCD - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	227
Abbildung 20:	LCD-Anzeigen zur Indiumrückgewinnung - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.	231
Abbildung 21:	Tantalkondensatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.....	235
Abbildung 22:	Ablauf des Recyclingprozesses	247
Abbildung 23:	Lageraufbau, Prinzipskizze.....	261
Abbildung 24:	Carbon Footprint verschiedener Edel- und Sondermetalle im globalen Markt mix in Abhängigkeit von deren Konzentration in der Bündelungsebene.	320
Abbildung 25:	Wert nach Neuwarenpreis für verschiedene Konzentrationen der Zielelemente	321
Abbildung 26:	GWP und Neuwarenpreise für die Bereitstellung eines Teils der Zielelemente	322
Abbildung 27:	Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Erfassung.....	328
Abbildung 28:	Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Demontage.....	329
Abbildung 29:	Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Aufbereitung	330
Abbildung 30:	Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Verwertung	331
Abbildung 31:	Schematische Darstellung der Bewertungsmethode	333
Abbildung 32:	Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte	347

Abbildung 33:	Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Definition der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Erfassung.....	348
Abbildung 34:	Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Beschreibung und Bewertung der Maßnahmenoption A1 im Verfahrensschritt Aufbereitung.....	351
Abbildung 35:	Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der zugrundegelegten Gewichtung der Kriterien (Charakterisierungsparameter)	351
Abbildung 36:	Maske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Maßnahmenbewertung im Verfahrensschritt Aufbereitung.....	352
Abbildung 37:	Darstellung des Gesamtergebnisses im Tabellenkalkulations-Tool (Hinweis: insbesondere der Erfassungsgrad beruht auf wenig belastbaren Annahmen)	353
Abbildung 38:	Magnete aus Industriemotoren: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte	357
Abbildung 39:	Magnete aus IT-Komponenten am Beispiel Festplatten: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte	363
Abbildung 40:	Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte.....	367
Abbildung 41:	Brutto-Umweltentlastungspotenzial der Zielmetalle in den betrachteten Abfallströmen durch Verzicht auf ihre Primärproduktion; dargestellt anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen (Angaben in Einwohnerwerten); Carbon Footprint Einwohnerwerte Deutschland: 11,4 t CO ₂ eq/a (Quelle: Umweltbundesamt 2018); Carbon Footprint Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).	386

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Herausforderungen und Lösungsansätze entlang einer generischen Recycling-Kette	26
Tabelle 2:	Angenommene Ausbeuten im edelmetallhaltigen Abfallstrom „Leiterplatten aus Altfahrzeugen“	35
Tabelle 3:	Angenommene Ausbeuten aus dem seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom „NdFeB-Magnete“	36
Tabelle 4:	Kriterium A: Wert Konzentration.....	68
Tabelle 5:	Kriterium B: Mengenpotenzial.....	70
Tabelle 6:	Kriterium C: Separationsaufwand im Verhältnis zum Wertpotenzial	70
Tabelle 7:	Kriterium D: Verwertungsprozess	70
Tabelle 8:	Kriterium E: Informationslage	71
Tabelle 9:	Kriterium F: Erfassungs- und Bündelungssystem	71
Tabelle 10:	Beispiel für die Bewertung der Abfallströme	72
Tabelle 11:	Bewertung silberhaltiger Abfallströme	73
Tabelle 12:	Bewertung goldhaltiger Abfallströme	74
Tabelle 13:	Bewertung palladiumhaltiger Abfallströme	75
Tabelle 14:	Bewertung platinhaltiger Abfallströme	75
Tabelle 15:	Bewertung galliumhaltiger Abfallströme	77
Tabelle 16:	Bewertung germaniumhaltiger Abfallströme.....	78
Tabelle 17:	Bewertung indiumhaltiger Abfallströme	79
Tabelle 18:	Bewertung tantalhaltiger Abfallströme	80
Tabelle 19:	Bewertung cerhaltiger Abfallströme	81
Tabelle 20:	Bewertung lanthanhaltiger Abfallströme	82
Tabelle 21:	Bewertung neodym-, dysprosium- und praseodymhaltiger Abfallströme	84
Tabelle 22:	Bewertung weiterer SEE-haltiger Abfallströme.....	85
Tabelle 23:	Relevante Abfallströme mit Zuordnung zu den Themenbereichen der Untersuchung	86
Tabelle 24:	Ausgewählte Edel- und Sondermetalle und deren zu untersuchende Anwendungsgebiete mit Zuordnung zu den Themenbereichen der Studie	88
Tabelle 25:	Gestaltungsparameter zur Optimierung von Fließsystemen nach Klaus; Quelle: Eigene Darstellung nach Klaus (2002; S. 90f.)	90
Tabelle 26:	Ausgewählte Herausforderungen einer generischen Recycling-Kette; Quelle: eigene Darstellung	96
Tabelle 27:	Lösungsansätze entlang einer generischen Recycling-Kette	106

Tabelle 28:	Notwendige Entwicklungen zur Nutzung von Auto-ID Systemen für Wertstoffidentifikation in Sortierung und Demontage.....	116
Tabelle 29:	Bündelungspotenziale der einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Stoffströme nach Sammelstellen.....	159
Tabelle 30:	Mengen- und Wertpotenziale an NdFeB-Magneten im Abfall im Jahr 2020 aus unterschiedlichen Einsatzbereichen sowie die typischen Zusammensetzungen der Magnete.....	164
Tabelle 31:	Bewertung des Ist-Zustandes der Erfassung von NdFeB-haltigen Abfällen aus Sicht der Logistik.....	167
Tabelle 32:	Mengengerüst Magnete aus Antriebssträngen von Hybrid- und Elektro-Altfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	172
Tabelle 33:	Mengengerüst Magnete aus kleinen E-Motoren aus Altfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	173
Tabelle 34:	Mengengerüst Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	174
Tabelle 35:	Mengengerüst Magnete aus Nabendynamos in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	175
Tabelle 36:	Mengengerüst Magnete aus Industriemotoren in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	176
Tabelle 37:	Mengengerüst Magnete aus Festplatten, Kopfhörern und Lautsprechern in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	177
Tabelle 38:	Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Erstbehandler gegenüber anderen Akteuren haben.....	180
Tabelle 39:	Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Logistiker gegenüber anderen Akteuren haben.....	181
Tabelle 40:	Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Verwerter gegenüber anderen Akteuren haben.....	182

Tabelle 41:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von edelmetallhaltigen Leiterplatten, Lambdasonden und Zündkerzen	191
Tabelle 42:	Mengengerüst Fahrzeugelektronik (Annahme: 48 Verarbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ag, Au, Pd, Pt).....	194
Tabelle 43:	Mengengerüst Lambdasonden (Annahme: 48 Verarbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Pt, Pd).....	195
Tabelle 44:	Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Altfahrzeugdemontagebetriebe gegenüber anderen Akteuren haben	198
Tabelle 45:	Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Logistiker gegenüber anderen Akteuren haben.....	198
Tabelle 46:	Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Verwerter (Elektroaltgeräteaufbereiter) gegenüber anderen Akteuren haben.....	199
Tabelle 47:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von edelmetallhaltigen Umweltkatalysatoren	204
Tabelle 48:	Mengen- und Wertpotenziale an Cer und Lanthan aus unterschiedlichen Einsatzbereichen für das Jahr 2020	207
Tabelle 49:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Poliermitteln zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan	208
Tabelle 50:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von FCC- Katalysatoren zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan.....	209
Tabelle 51:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung der Schlacken aus der Aufbereitung von Autokatalysatoren zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan	210
Tabelle 52:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von NiMH- Batterien zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan	210
Tabelle 53:	Mengengerüst Cer und Lanthan aus Polierschlämmen (Annahme: 48 Verarbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)	216
Tabelle 54:	Mengengerüst Cer und Lanthan aus FCC-Katalysatoren (Annahme: 48 Verarbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)	216
Tabelle 55:	Mengengerüst Gewinnung von Cer und Lanthan aus Autokatalysatoren (Annahme: 48 Verarbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)	217

Tabelle 56:	Mengen- und Wertpotenziale an Seltenerdmetallen in Leuchtstoffen aus unterschiedlichen Einsatzbereichen. Die Herleitung der Mengenpotenziale in Deutschland wird im Text erläutert.....	219
Tabelle 57:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Leuchtstofflampen zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen.....	221
Tabelle 58:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von CRT-Geräten zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen.....	222
Tabelle 59:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von LCD-Geräten zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen.....	223
Tabelle 60:	Mengengerüst Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	228
Tabelle 61:	Mengengerüst Leuchtstoffe aus LCD-Anzeigen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle).....	229
Tabelle 62:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von LCD-Geräten zur Rückgewinnung von Indium	230
Tabelle 63:	Mengengerüst Indium aus LCD Anzeigen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Indium).....	232
Tabelle 64:	Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Leiterplatten zur Rückgewinnung von Tantal aus Kondensatoren.....	234
Tabelle 65:	Mengengerüst Tantalkondensatoren (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Tantal)	236
Tabelle 66:	Zur Analyse der Zweckmäßigkeit einer möglichen Zwischenlagerung vorausgewählte Abfälle	238
Tabelle 67:	Vorausgewählte Abfallströme und ihre Bewertung; Potenzial ohne Berücksichtigung von Verlusten bei Erfassung und Aufbereitung und ohne Berücksichtigung des Verwertungsaufwands; Kritikalität von Magnetanwendungen mit typischen Dysprosiumgehalten von ca. 10 % wird mit 13 bewertet, alle übrigen mit 12; Leuchtstoffe werden wegen des hohen Dysprosiumgehaltes mit 14 bewertet. Metallgehalte <5% in Klammern; n.b. = nicht bekannt	240
Tabelle 68:	in Kapitel 2.1 vorausgewählte Abfallströme mit Zielmetallen. Metallgehalte <5% in Klammern; n.b. = nicht bekannt.	244
Tabelle 69:	Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete und ihre Vor- und Nachteile	249
Tabelle 70:	Recyclingverfahren für Poliermittel.....	252
Tabelle 71:	Recyclingverfahren für NiMH-Batterien	253
Tabelle 72:	Recyclingverfahren für Spezialgläser	254
Tabelle 73:	Recyclingverfahren für FCC-Katalysatoren	254

Tabelle 74:	Recyclingverfahren für KFZ-Katalysatoren	255
Tabelle 75:	Recyclingverfahren für indiumhaltige Abfallströme (Quelle: Zhang et. al. 2015)	255
Tabelle 76:	Recyclingverfahren für leuchtstoffhaltige Abfallströme	257
Tabelle 77:	Bewertung Separationsgrad für NdFeB-Magnete	265
Tabelle 78:	Bewertung Einlagerungsform von kleineren und mittelgroßen Magneten (Magnete aus E-Fahrzeugen, kleine E-Motoren aus Pkw, Elektrofahrrädern, Industriemotoren)	267
Tabelle 79:	Bewertung Einlagerungsform von großen Magneten (Magnete aus Windenergieanlagen, medizinischen Geräten)	267
Tabelle 80:	Bewertung Einlagerungsform von zerkleinerten Magnetschrotten (Magnete aus Festplatten, Kopfhörern)	268
Tabelle 81:	Anforderungen an NdFeB-Magnete für die Zwischenlagerung.....	268
Tabelle 82:	Anforderungen an das Zwischenlager für Magnete	269
Tabelle 83:	Bewertung Separationsgrad Poliermittel	271
Tabelle 84:	Bewertung Einlagerungsform für Poliermittel	272
Tabelle 85:	Anforderungen an Poliermittel für die Zwischenlagerung	272
Tabelle 86:	Anforderungen an das Zwischenlager für Poliermittel.....	273
Tabelle 87:	Bewertung Einlagerungsform für indiumhaltige Glasfraktion.....	274
Tabelle 88:	Anforderungen an separierte indiumhaltige Glasfraktion	274
Tabelle 89:	Anforderungen an das Zwischenlager für indiumhaltige Glasfraktion.....	275
Tabelle 90:	Bewertung Einlagerungsform für Leuchtstoffe	276
Tabelle 91:	Anforderungen an Leuchtstoffe für die Zwischenlagerung	277
Tabelle 92:	Anforderungen an das Zwischenlager für Leuchtstoffe	277
Tabelle 93:	Überblick über unterschiedliche Genehmigungsanforderungen für die Lagerung von Abfällen	282
Tabelle 94:	Mengen- und Wertbetrachtung für die Zwischenlagerung der zu analysierenden Abfallströme; Annahme; jährlich angenommene Menge angesetzt mit Mittelwert aus Potenzial heute und 2017	316
Tabelle 95:	Grobe Abschätzung der Investitionskosten für ein Lager mit 1.000 m ² Lagerfläche, 100m ² Nebenfläche (Büro, Sozialraum, Sanitärbereich, Abstellmöglichkeiten) und 660 m ² Verkehrsfläche (10%) außen	317
Tabelle 96:	Ausbeuten fiktiver IST-Prozessketten (Fall A - D)	323
Tabelle 97:	Beispielhafte Faktoren, die die Kennzahlen einer Nutzwertanalyse beschreiben können	324
Tabelle 98:	Unterschiedliche Abhängigkeiten der Kennzahlen vom Rückgewinnungsgrad am Beispiel einer fiktiven Recyclingkette.....	325
Tabelle 99:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog I: Organisatorische Maßnahmen	335

Tabelle 100:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog II: Manuelle Prozesse (u.a. Demontage, Sortierung)	335
Tabelle 101:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog III: Mechanische Prozesse (u.a. Zerkleinerung, Auftrennung, Klassierung, Sortierung)	335
Tabelle 102:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog IV: Hydrometallurgische Prozesse (u.a. Laugung, Fällung, Solventextraktion, Ionenaustausch, Aufkonzentrierung).....	336
Tabelle 103:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog V: Pyrometallurgische Prozesse (u.a. Stein- und Reduktionsschmelzen, Feuerraffination, Seigerung)	336
Tabelle 104:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog VI: Hochtemperaturprozesse (Prozesse mit Temperaturen > 600 °C).....	337
Tabelle 105:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog VII: Niedertemperaturprozesse (Prozesse mit Temperaturen < 400 °C).....	337
Tabelle 106:	Allgemeiner Maßnahmenkatalog VIII: Übergeordnete Steuerungsmaßnahmen	338
Tabelle 107:	Attributsausprägungen der verwendeten Kriterien	339
Tabelle 108:	Default-Werte für die Bewertung organisatorischer Maßnahmen	339
Tabelle 109:	Default-Werte für die Bewertung manueller Prozesse	340
Tabelle 110:	Default-Werte für die Bewertung mechanischer Prozesse	341
Tabelle 111:	Default-Werte für die Bewertung hydrometallurgischer Prozesse	341
Tabelle 112:	Default-Werte für die Bewertung pyrometallurgischer Prozesse	342
Tabelle 113:	Default-Werte für die Bewertung von Hochtemperaturprozessen	343
Tabelle 114:	Default-Werte für die Bewertung von Niedertemperaturprozessen.....	343
Tabelle 115:	Verwendete Daten zu GWP und KEA der betrachteten Zielmaterialien.....	344
Tabelle 116:	Neuwarenwerte der betrachteten Zielmaterialien	345
Tabelle 117:	Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen	349
Tabelle 118:	Charakterisierung der Maßnahmenoptionen.....	350
Tabelle 119:	Angenommene Ausbeuten im edelmetallhaltigen Abfallstrom <i>Leiterplatten aus Altfahrzeugen</i>	354
Tabelle 120:	Aufkommen und Zusammensetzung der betrachteten NdFeB-Magnete.....	355
Tabelle 121:	Wertpotenziale, vermeidbare treibhauswirksame Emissionen sowie der theoretisch vermeidbare Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern der betrachteten NdFeB-Magnete.....	356
Tabelle 122:	Magnete aus Industriemotoren: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen.....	359
Tabelle 123:	Magnete aus Industriemotoren: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen.....	359

Tabelle 124:	zugrundegelegte Gewichtung der Kriterien (Charakterisierungsparameter)	361
Tabelle 125:	Magnete aus IT-Komponenten: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen.....	364
Tabelle 126:	Magnete aus IT-Komponenten: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen.....	365
Tabelle 127:	Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen.....	369
Tabelle 128:	Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen.....	370
Tabelle 129:	Angenommene Ausbeuten im seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom <i>NdFeB-Magnete</i>	373
Tabelle 130:	Bewertung der Maßnahmen für seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe	377
Tabelle 131:	Bewertung der Maßnahmen für edelmetallhaltige Leiterplatten und Lambdasonden aus Altfahrzeugen	379
Tabelle 132:	Bewertung der Maßnahmen für edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren	380
Tabelle 133:	Bewertung der Maßnahmen für cer- und lanthanhaltige Abfallströme	381
Tabelle 134:	Bewertung der Maßnahmen für separierte indiumhaltige LCD-Schichten	382
Tabelle 135:	Mengenpotenziale der Zielmetalle in den analysierten Abfallströmen in Deutschland im Jahr 2020 und Treibhausgasemissionen ihrer Herstellung aus mineralischen Rohstoffen sowie Tendenz der künftigen Entwicklung der Potenziale); spezifische Treibhausgasemissionen Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).	385

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route (Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße)
AVV	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid – Photovoltaikmodule
CO₂	Kohlendioxid
CRT	Kathodenstrahlröhrenbildschirm (Cathode Ray Tube)
ECHA	European Chemicals Agency
EG	Europäische Gemeinschaft
eq	Äquivalente
EU	Eurpoäische Union
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FE	Eisenwerkstoffe
GWP	Global Warming Potential
ID	Identification
IDIS	International Dismantling Information System
ILESA	Projektkronym: Intelligente Lenkung von edel- und sondermetallhaltigen Abfallströmen
InAccess	Projektkronym: Entwicklung eines ressourceneffizienten und wirtschaftlichen Recyclingprozesses für LCD-Bildschirmgeräte unter besonderer Berücksichtigung der Rückgewinnung des Indium-Inhalts, Forschungsprojekt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung , FKZ 033R088
KEP	Kurier-, Express- und Paketdienste
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCD	Flüssigkristallanzeige (Liquid crystal display)
LDL	Logistikdienstleister
LED	Leuchtdiode (Light emitting diode)
MinSEM	Projektkronym: Konzept zur Rückgewinnung von Seltenerdelementen sowie Platingruppenmetallen aus mineralischen Aufbereitungs- und Produktionsrückständen, Laufendes Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), FKZ 033R141
MRT	Magnetresonanztomographie
NdFeB-Magnet	Neodym-Eisen-Bor-Magnet
NiMH	Nickel-Metallhydrid

ORKAM	Projektkronym: Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien zur Rückgewinnung kritischer und umweltrelevanter Altfahrzeugmetalle, Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3713 33 337
PET	Polyethylenterephthalat
PGM	Platingruppenmetalle
PGNAA	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis
PV	Photovoltaik
QS	Qualitätssicherung
RePro	Projektkronym: Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3711 95 318
ReStra	Projektkronym: Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien. Kurztitel: Recyclingpotenzial strategischer Metalle. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3711 93 339
RFID	Radio-Frequency Identification
RL	Richtlinie
RWWS	Recycling-Warenwirtschaftssystem
SCM	Supply Chain Management
SEE	Seltenerdmetall
TBC	Thermal Barrier Coating
TUL	Transport, Umschlag, Lagerung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
USGS	United States Geological Survey
WEEE-RL	Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte
WWS	Warenwirtschaftssystem

Zusammenfassung

1. Einführung

Sondermetalle wie Neodym und weitere Seltenerdmetalle, Indium oder Tantal werden in Deutschland heute nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maße aus Post-Consumer-Abfällen zurückgewonnen. Dies liegt zum Teil daran, dass viele der Produkte, die solche Metalle enthalten, noch nicht lange auf dem Markt sind, so dass sowohl der Aufbau von großtechnischen Recyclingverfahren noch nicht erfolgt ist als auch die Rücklaufmengen noch zu gering sind. Für die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Abfällen gibt es zwar seit vielen Jahren bewährte Verfahren, eine Herausforderung stellt jedoch ihre effiziente Erfassung und Separation auch aus gering konzentrierten Abfallströmen aus einer Vielzahl kleiner Anfallstellen dar. Die Konzentration bzw. die Menge an Edel- und Sondermetallen in Altprodukten oder Bauteilen ist zudem häufig so gering, dass ihre Erfassung oder Separation aus den Abfallströmen aktuell nicht wirtschaftlich ist.

Die Untersuchung befasste sich schwerpunktmäßig mit den Abfallströmen Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB-)Magneten, Fahrzeugelektronik, edelmetallhaltigen Umweltkatalysatoren, cer- und lanthanhaltigen Abfallströmen, seltenerdmetallhaltigen Leuchtstoffen, indiumhaltigen LCD-Schichten und Tantalkondensatoren. Für diese Abfallströme wurde untersucht, wie neuartige Logistikkonzepte und Ansätze zur intelligenten Organisation sowie zur Gestaltung von Material- und Informationsflüssen das Recycling verbessern können. Es wurden technische, organisatorische und rechtliche Möglichkeiten zur längerfristigen Zwischenlagerung solcher Abfälle, bis großtechnische Recyclingverfahren verfügbar sind, konkretisiert und geprüft. Schließlich wurden Wege zur Abschätzung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades erarbeitet und Maßnahmenvorschläge zur Erzielung von mehr Recycling entwickelt und bewertet.

2. Bündelung von edel- und sondermetallhaltigen Abfallströmen

2.1 Erfassungslogistikkonzepte und Gestaltung der Informationsflüsse

Die betriebswirtschaftliche Logistik ist eine wissenschaftliche Disziplin, die keinem einheitlichen Paradigma folgt. Aktuell setzt sich das Management von Fließsystemen als ein Verständnis der Logistik durch, das empirisch nachweislich erfolgreiche Leitlinien zur strategischen Planung sowie zu taktischen Entscheidungen und operativer Steuerung von Logistiksystemen bietet. Generell orientiert sich Logistik als betriebswirtschaftliche Disziplin an Effizienzsteigerungsmechanismen, die in der Industrialisierung erfolgreich etabliert wurden. Logistik begreift dabei Wertschöpfungsprozesse oder Recyclingprozesse als Netzwerk miteinander verbundener Akteure/Unternehmen, die gemeinsam den Gesamtprozess durchführen. Die Netze werden in Knoten- und Kantenmodellen abgebildet. Dabei stellen Knoten z.B. Lager und Unternehmen dar und Kanten die verbindenden Lieferbeziehungen. Ein solches Modell visualisiert das Netzwerk und gibt Aufschluss über Anzahl und Eigenschaften der Knoten, ggf. auch deren Lage zueinander und über die Verbindung der Knoten miteinander (Kanten) sowie ggf. deren Eigenschaften. Dabei haben logistische Netzwerke mehrere Ebenen. Die hier fokussierten Ebenen sind die physische Ebene der Güter und die informatorische Ebene zur Steuerung der physischen Güterebene. Verbesserungen von logistischen Prozessen können auf beiden Ebenen erfolgen, wobei diese jeweils wechselwirkend aufeinander Einfluss haben. Ergänzend wurde die finanzielle Ebene betrachtet. Diese bietet Anreiz und Motivation für unternehmerisches Handeln.

Die Herausforderungen in der entsorgenden Recyclinglogistik unterscheiden sich an einigen Stellen von denen der Distributionslogistik in versorgenden Wertschöpfungsketten. Daher wurden die Herausforderungen in Recyclingketten auf den genannten Ebenen generisch zusammengestellt und die jeweiligen Lösungsansätze im Einzelnen beschrieben. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Herausforderungen und Lösungen, strukturiert nach Stufen in der Recyclingkette und Netzwerkebene.

Tabelle 1: Herausforderungen und Lösungsansätze entlang einer generischen Recycling-Kette

	Sammelstelle	Sortierung und Demontage	Rückgewinnung
Physische Ebene	<p><u>Herausforderung:</u> Problematik der First Mile Zeitliche und stoffliche Bündelung Organisation von Behältersystemen Nutzungsadäquate Handhabung in Sammelstellen</p> <p><u>Lösung:</u> Tourenplanung für zeitliche (und stoffliche) Bündelung sowie Mengenbündelung Prozessuale Verkürzung der Stoppzeiten</p>	<p><u>Herausforderung:</u> Positionierung von Sortierung und Demontage in Recycling-Kette Optimierung manueller Prozesse zur Reduzierung von Lohnstückkosten</p> <p><u>Lösung:</u> Zusammenstellung und Bereitstellung von Demontageinformationen in Kette</p>	<p><u>Herausforderung:</u> (Intralogistik) Produktions-/aufbereitungsnahe Lagerhaltung Lagerung von Behältern Logistische Bearbeitung von Kuppelprodukten</p> <p><u>Lösung:</u> Allokation von Angebot und Nachfrage</p>
Informatorische Ebene	<p><u>Herausforderung:</u> Steuerung von Sammelprozessen Auslösung von Abholungen Planbarkeit der Mengen Freiheitsgrade für Planungsprozesse Reduzierung von Stoppkosten/Stoppszeiten</p> <p><u>Lösung:</u> Automatisierung bzw. Teilautomatisierung der Füllstandsmeldung Planbarkeit der Mengen Freiheitsgrade für Planungsprozesse Digitale Spotmarkt Plattform für Abholung Anmeldung zur Reduzierung der Stoppkosten</p>	<p><u>Herausforderung:</u> Identifikation von Wertstoffen Information zu Zugänglichkeit für Demontage</p> <p><u>Lösung:</u> Auto-ID System zur Identifikation von Wertstoffen in Bauteilen Offene Informationsplattformen für Informationen zur Zugänglichkeit der Bauteile Bereitstellung von geprüften Demontageanleitungen auf (offenen) Plattformen</p>	<p><u>Herausforderung:</u> (Steuerung der Intralogistik) Planung der Distribution der Produkte durch Allokation von Angebot und Nachfrage</p> <p><u>Lösung:</u> Spotmarkets vs. Kooperationen</p>
Finanzielle Ebene/ Motivations/Anreiz	<p><u>Herausforderung:</u> Rechtliche Verpflichtungen Wirtschaftliche Attraktivität Wechselwirkung beider Aspekte</p> <p><u>Lösung:</u> Vergabe zu Marktpreisen an Logistikdienstleister, die mögliche Bündelungseffekte heben können</p>	<p><u>Herausforderung:</u> Steigerung der wirtschaftlichen Attraktivität durch Strukturierung der Lernkurve</p> <p><u>Lösung:</u> Gezielte Nutzung der Erfahrungskurve</p>	<p><u>Herausforderung:</u> Erläsoptimierung vs. Kundenbindung Logistische Aufwände für Nebenprodukte</p> <p><u>Lösung:</u> (Spotmarkets vs. Kooperationen)</p>
Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion			

Analog zur „Last Mile“ der Distributionslogistik gilt die „First Mile“ der Entsorgungslogistik als besonders anspruchsvoll. Die „Last Mile“ in der Logistik beschreibt den Transport zur „Haustür“ des Kunden und ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl weitverteilter Anlieferpunkte mit kleinen Mengen pro Anlieferung. Entsprechend hoch ist der Anteil der „Last Mile“ an den Gesamt-Zustellungskosten. Analog dazu ist in der Entsorgungslogistik die „First Mile“ des Abfalls, von den teilweise zahlreichen Sammelstellen/ Demontagebetrieben zur Behandlungsanlage in oft in geringen Mengen, mit großen Herausforderungen verbunden.

Nach dem Verständnis der Logistik als Management von Fließsystemen liegt ein wesentlicher Effizienzgewinn in der unternehmens- bzw. stufenübergreifenden Koordination von Prozessketten. Daher wurde auch ein Modell betrachtet, in dem Unternehmen als Systembetreiber den gesamten logistischen Ablauf quer über die Stufen hinweg koordinieren. In einem solchen Konzept können mehrere, in den Stufen aufgezeigten Lösungsansätze, integriert werden.

Wesentliche Basis für ein Logistikmanagement ist die Verfügbarkeit von Informationen. Für die betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfälle existieren aktuell keine oder nur wenige etablierte Recyclingketten. Entsprechend sind kaum Vergangenheitswerte verfügbar. Ein Vorschlag ist daher die Etablierung eines softwaregestützten Systems zu unterstützen, das beim Aufbau einer Recyclingkette Daten zu logistischen Prozessen (insb. Bewegungs- und Mengendaten) erfasst und speichert, um datenbasiert iterativ Prozessverbesserungen vornehmen zu können. Diese kann unternehmensintern erfolgen, aber eben auch unternehmens- und stufenübergreifend in der Koordination ganzer Prozessketten.

Im vorgeschlagenen Softwaresystem (Recyclingwarenwirtschaftssystem, RWWS) lassen sich weitere Lösungsansätze für eine effizientere Abwicklung der Logistik abbilden. Z.B. die Füllstandmessung bei Sammelbehältern, die dann zur Steuerung von Abholungsprozessen und für die Planung zukünftiger Abholprozesse genutzt werden könnte.

Ebenso lassen sich Potenziale logistischer Bündelung deutlich besser bewerten, wenn Vergangenheitswerte zu Mengenaufkommen mit räumlichen Informationen und Bewegungsdaten ausgewertet und für Bündelungsbemühungen herangezogen werden können. Da diese Informationen heute nicht auswertbar vorliegen, soll auf Bündelungs-Workshops mit Praktikern und deren Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

2.2 Rechtliche Aspekte der Separation und Kennzeichnung edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme

Ausbaupflichten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile von Elektroaltgeräten oder von Altfahrzeugen können und müssten gesetzlich auf nationaler und/oder europäischer Ebene geregelt werden. Die entsprechenden Regelwerke zu Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen bieten die Möglichkeit der Ergänzung von Verwertungsquoten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile, die von den Herstellern und/oder den Erstbehandlungsanlagen/Demontagebetrieben erreicht werden müssten.

Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Separation selbst mit anschließender Zwischenlagerung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile nicht als Teil der Verwertung eingestuft und daher noch nicht bei den Verwertungsquoten nach dem ElektroG mitberücksichtigt werden kann. Da bislang (fast) keine separate Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erfolgt und trotzdem die erforderlichen Verwertungsquoten erreicht werden, ist es möglich, dass eine Separation selbst bei evtl. anschließender Zwischenlagerung von einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen in der Praxis nicht zu Problemen beim Erreichen der Verwertungsquote führt. Zeitliche gesetzliche Vorgaben, wann die Verwertung beendet sein muss, gibt es nicht. Insofern kann eine Verwertung, die im Anschluss an die Zwischenlagerung durchgeführt wird, bei den Verwertungsquoten berücksichtigt werden. Falls aber das Erreichen der Verwertungsquote durch verstärkte Separation und Zwischenlagerung einzelner Bauteile oder Gruppen von Bauteilen bis zur tatsächlichen und endgültigen Verwertung in der Praxis problematisch werden sollte, wäre ein möglicher Lösungsansatz, das ElektroG da-

hingehend zu ändern, bereits die Zwischenlagerung, zumindest die von sondermetallhaltigen Bauteilen, ausnahmsweise als (ggf. vorläufige) Verwertung einzustufen, z. B. sofern die tatsächlich folgende Verwertung zugesichert wird. Einer solchen Gesetzesänderung auf nationaler Ebene stehen allerdings derzeit die Vorgaben der WEEE-RL entgegen, welche die Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Sofern eine Änderung der Verwertungsdefinition angestrebt wird, ist daher auch der europäische und nicht allein der nationale Gesetzgeber gefragt.

2.3 Verwertungsprozesse, Bündelungs- und Informationskonzepte

Seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe

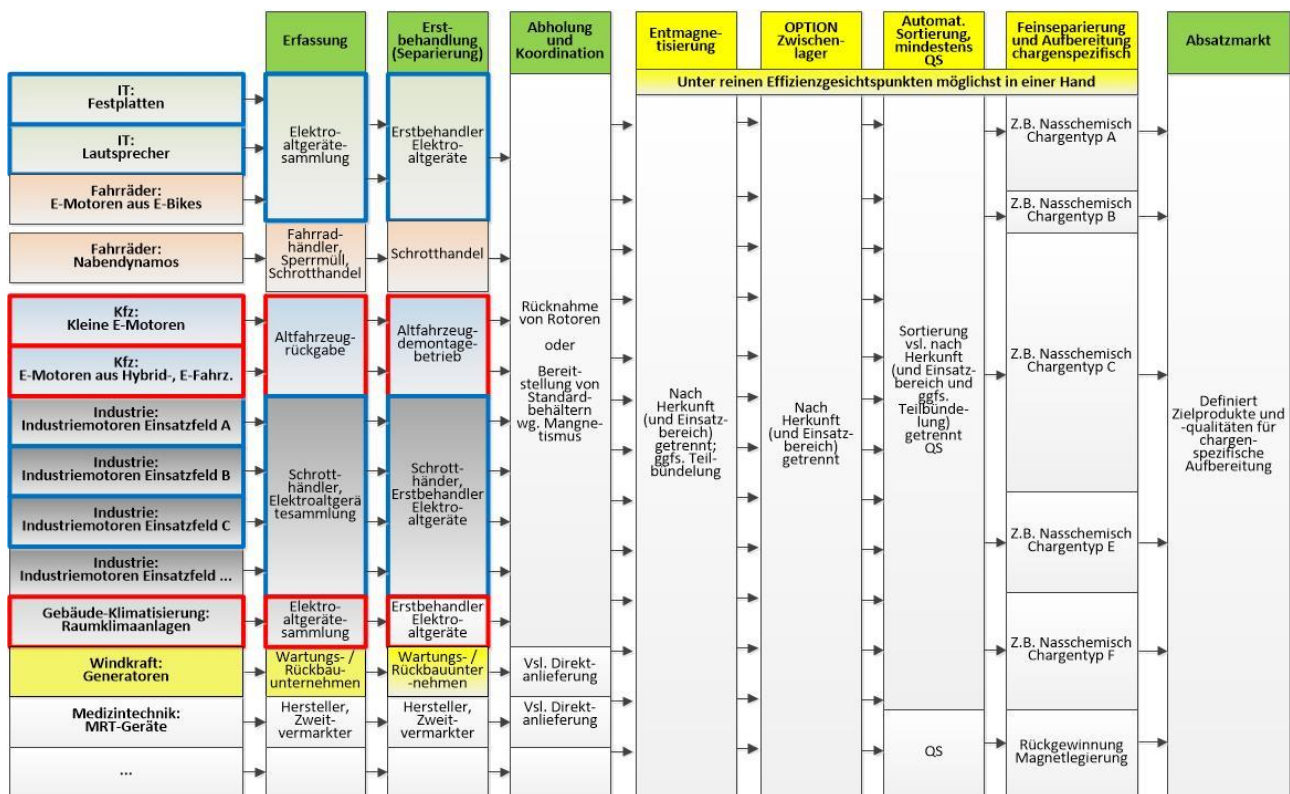
Erschwert wird der Aufbau von Verwertungslösungen zunächst dadurch, dass in den Abfallströmen mit den größten Aufkommen (derzeit Festplatten) die Magnetmenge pro Einzelgerät sehr klein ist, während Abfallströme mit großen Einzelmengen (z.B. Windenergieanlagen) derzeit nur ein geringes Gesamtpotential aufweisen. Bei Elektrofahrrädern, Pkw und Raumklimaanlagen wird allerdings mit einem starken Mengenwachstum gerechnet. Das tatsächlich in Deutschland verfügbare Potenzial ergibt sich aus den in den Anwendungen eingesetzten Mengen an Magnetmaterial abzüglich der Anteile, die exportiert werden oder unsachgemäß entsorgt werden. Zudem müssen Materialverluste in der Prozesskette berücksichtigt werden.

Insgesamt größter Kostenfaktor ist die Demontage der Magnete. Für vergleichsweise große Magnete erscheint jedoch eine wirtschaftliche Demontage insbesondere in größeren Betrieben langfristig nicht unrealistisch. Zur wirtschaftlichen Umsetzung der Gesamtprozesskette bis zur Gewinnung marktfähiger Materialfraktionen sind aber Durchsätze erforderlich, die nur mit wachsenden Abfallströmen großer Mengenpotenziale und Mengenbündelung erreichbar sein dürften.

Neben den unten skizzierten regulatorischen Maßnahmen können Handreichungen für Demontagebetriebe zur Übertragung von Lean Management-Ansätzen auf die Zerlegeprozesse die Reduzierung des Demontageaufwandes unterstützen.

Abbildung 1 zeigt ein mögliches grobes Prozesskettenkonzept für die Bündelung und Verarbeitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen.

Abbildung 1: Grobes Prozesskettenkonzept zur Bündelung und Aufbereitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen; blaue Rahmen: derzeit mengenmäßig dominante Abfallströme; rote Rahmen: stark wachsende Mengenströme



Die erforderliche Entmagnetisierung sollte bei einem zentralen Aufbereiter in großen und effizienten Durchlauföfen erfolgen. Es muss gewährleistet sein, dass keine anderen Magnettypen in den Prozess geraten. Zudem variieren NdFeB-Magnete erheblich in der Zusammensetzung, sodass eine Sortierung oder getrennte Erfassung für eine hochwertige Weiterverarbeitung kaum verzichtbar erscheint.

Grundsätzlich sind zwei Arten der Bündelung zu unterscheiden: Bündelung in der Abholung und Bündelung in der Aufbereitung und Verarbeitung. Bei der Abholung senkt ein gemeinsamer Transport von (gekennzeichneten) Mengen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen, aber einheitlichen Anfallstellen in der Regel die Transportkosten.

An welchen Stellen der Prozesskette zur Aufbereitung und Verarbeitung Teilmengen gebündelt, also vermischt werden sollten, hängt unter anderem ab von Größe und Einheitlichkeit der Teilmengen, den enthaltenen Fremdstoffen, dem vorgesehenen Aufbereitungsverfahren und den Anforderungen an die Qualität des Sekundär-Magnetmaterials sowie von den Anforderungen der Abnehmermärkte der Sekundärmaterialien und der Höhe der zu erwartenden Vergütung. So würden große Magnete etwa aus großen Motoren oder Windkraftanlagen über angepasste Prozessketten laufen müssen. Magnetmaterial, das in größerer Menge in gut definierter Form und Zusammensetzung anfällt, könnte ggfs. direkt, etwa zur Rückgewinnung von Magnetlegierungen, weiterverarbeitet werden. Anstelle einer manuellen Entfernung sollten insbesondere bei kleinteiligen Magneten in großen Stückzahlen (z.B. aus Festplatten) mechanische bzw. automatische Separationsverfahren eingesetzt werden.

Eine Aufbereitung bis hin zur Separation reiner Seltenerdmetalle oder -metalloxide erfordert sehr aufwändige Trennprozesse und ist wohl nur in einer bestehenden Anlage, ggf. im Ausland, realistisch. Zentrale Aufbereiter für NdFeB-Magnete würden sich, sofern sie nicht bereits solche Prozesse betreiben, auf die Rückgewinnung von Magnetlegierungen und/oder die Abtrennung von Seltenerdmetalloxid-Konzentraten beschränken, die dann an Aufbereitungsspezialisten für Seltenerdmetalle abgegeben werden.

Interessierte Akteure könnten einen weitgehend unbesetzten voraussichtlichen Wachstumsmarkt besetzen, sobald insbesondere Altprodukte mit großen Magneten in größerer Zahl entsorgt werden. Es bleibt jedoch das Risiko der Refinanzierung der Investitionskosten. Fraglich ist, welche Vergütung an Erstbehandler gezahlt werden muss, um Lieferbereitschaft und Lieferqualität zu sichern. Abnahmebereitschaft und Konditionen der Verwerter von Seltenerdmetallkonzentraten respektive Preisschwankungen am Rohstoffmarkt sind kaum prognostizierbar. Änderungen an Magnet-Rezepturen oder Produktdesigns können ebenfalls das Geschäft gefährden. Trotz aller Schwierigkeiten erscheint eine Umsetzung denkbar.

Regulatorische Maßnahmen können unterstützend wirken. Denkbar sind insbesondere:

- Eine Pflicht zur Kennzeichnung von Motoren mit NdFeB-Magneten, die Einzelmagnete ab einer definierten Masse enthalten.
- Eine Verpflichtung, NdFeB-Magnete, die als solche bekannt bzw. erkennbar sind, sowie aus gekennzeichneten Motoren und Geräten auszubauen und einer Verwertung zuzuführen.
- Die Verpflichtung zum demontagegerechten Einbau von NdFeB-Magneten, sofern kein Zielkonflikt mit Energie- und Materialeffizienz besteht.

Edelmetallhaltige Bauteile aus Altfahrzeugen

Die über die Elektronikkomponenten verteilte Leiterplattenmenge je Altfahrzeug kann mit ca. einem Kilogramm abgeschätzt werden. Allerdings können bei Weitem nicht alle Leiterplatten und Elektronikbauteile mit vertretbarem Aufwand ausgebaut werden. Ein weiteres Hemmnis besteht darin, dass je Altfahrzeugverwerter nur kleine Mengen an Fahrzeugelektronik oder Lambdasonden anfallen. Zur Separation von edelmetallhaltigen Fraktionen aus Elektronikkomponenten können Prozesse der Elektroaltgeräteaufbereitung genutzt werden, die großenteils verfügbar sind. Zunächst kann dabei der manuelle Ausbau von leiterplattenhaltigen Bauteilen erfolgen sowie das Aufbrechen von Gehäusen und Freilegen der enthaltenen Leiterplatten z.B. in Prallmühlen mit anschließender manueller oder automatischer Sortierung. Aus den gewonnenen Leiterplatten-Sortierfraktionen werden in Kupferhütten oder anderen metallurgischen Prozessen die Edelmetalle zurückgewonnen.

Lambdasonden werden aufgrund ihres vergleichsweise hohen Wertes zum Teil bereits heute ausgebaut und an Verwerter abgegeben. Hier wie auch bei der Separation von Fahrzeugelektronik und den darin enthaltenen Leiterplatten stehen also Verwertungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Herausforderung besteht somit in der schlechten Wirtschaftlichkeit von Separation und Logistik.

Die Wirtschaftlichkeit könnte dadurch verbessert werden, dass Altfahrzeug-Demontagebetriebe leicht ausbaubare edelmetallhaltige Komponenten separieren und sie mit demontierten, aber nicht verkaufbaren Gebrauchtteilen bündeln. Bei der Abholung sollten etablierte Abholbeziehungen zu z.B. Entsorgungslogistikern und Aufbereitern ausgebaut werden. Für letztere wäre bei der Abhollogistik eine Bündelung ähnlicher edelmetallhaltiger Abfallströme, z.B. aus der Werkstattentsorgung, vorteilhaft. Handreichungen für die Demontagebetriebe zur Übertragung von Lean Management-Ansätzen auf Demontageprozesse können die Reduzierung des Demontageaufwandes unterstützen. Ein marktgetriebener Ansatz mit erheblicher Mengenwirkung erscheint für diesen Abfallstrom dennoch nicht realistisch.

Sollte ein regulatorisch getriebener Ansatz realisiert werden, so sind folgende, überwiegend zunächst im europäischen Recht zu verankernde Regelungen denkbar.

- Designvorgaben an die Fahrzeugindustrie zum demontagegerechten Einbau größerer Elektronikkomponenten in Fahrzeuge.

- Verpflichtung zum Ausbau größerer Fahrzeugelektronik-Komponenten und zur Zufuhr zu einem Verwertungsprozess, bei dem Leiterplatten abgetrennt und der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden.

Weitere Abfallströme

Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren: Umweltkatalysatoren, die in geringen Einzelmengen beispielsweise in Blockheizkraftwerken oder der katalytischen Nachverbrennung eingesetzt werden, werden weit überwiegend dem Stahlschrott oder dem Restmüll zugeführt. Ein Round-Table-Gespräch mit Katalysatorherstellern und Vertretern von Katalysatoranwendern könnte dazu dienen, Möglichkeiten einer besseren Information der Anwender und eines Ausbaus der Rücknahmemöglichkeiten zu diskutieren. Da Umweltkatalysatoren nach dem Austausch ohnehin separiert vorliegen und damit grundsätzlich gut zugänglich und verwertbar sind, sollte zudem geprüft werden, ob die Einführung einer gesetzlichen Pflicht zur getrennten Sammlung zweckmäßig ist.

Cer- und lanthanhaltige Abfallströme: Wirtschaftliche Lösungen, die mit dem Aufbau aufwendiger und investitionskostenintensiver Aufbereitungsprozesse verbunden wären, sind wegen des geringen Wertes dieser Metalle nicht in Sicht. Aufgrund der hohen Cer-Gehalte kommt für Polierschlämme der Einsatz in der Keramikglasur oder auch in Gießereien in Frage. Auch dem stehen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen im Wege, allerdings ist die Schwelle hier wesentlich niedriger.

Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe: Die Abtrennung von Leuchtstoffen aus Leuchtstofflampen, CRT-Geräten und LCD-Geräten ist Stand der Praxis. Zur weiteren Aufbereitung zu Seltenerdmetallkonzentraten stehen Verfahren zur Verfügung, die derzeit aus Kostengründen nicht betrieben werden. Sollten die Prozesse wieder in Betrieb genommen werden, könnten diesen die separiert vorliegenden Mengen aus bestehenden Prozessen zugeführt werden. Darüber hinausgehende Bündelungskonzepte werden aufgrund der geringen und abnehmenden Menge für nicht zweckmäßig gehalten.

Indiumhaltige LCD-Schichten: Ausbau und Aufbereitung von LCD-Anzeigen und die Separation der dabei erhaltenen indiumreichen Glasfraktionen findet bereits statt. Es fehlt aber an einer Möglichkeit, aus der Glasfraktion Indium zurückzugewinnen. Hierzu liegen im Labormaßstab entwickelte Prozesse vor, deren Umsetzung bisher nicht in Sicht ist. Grundsätzlich könnte eine gesetzliche Vorschrift zweckmäßig sein, die Erstbehandler verpflichtet, die indiumhaltige Glasfraktion aus der Aufbereitung von LCD-Displays separat zu sammeln und einem Verfahren zur Indium-Rückgewinnung zuzuführen. Dies setzt allerdings voraus, dass entsprechende Verfahren verfügbar gemacht werden können. Um hier die Investitionsbereitschaft zu stärken, wäre es hilfreich, geeignete Separationsverfahren in den Pilotmaßstab weiterzuentwickeln.

Tantalkondensatoren: Zur Rückgewinnung müssen tantalreiche Leiterplatten beim Erstbehandler aussortiert und Anlagen zur Entstückung und Abtrennung von Tantalkondensatoren zugeführt werden. Zur Gewinnung des Tantals aus den Kondensatoren stehen Verfahren zur Verfügung. Die Betreiber dieser Prozesse zahlen für saubere Tantalkondensatoren je nach aktuellem Tantalpreis schon heute eine Vergütung. Eine Sortierung der Leiterplatten sollte von Unternehmen durchgeführt werden, die Anlagen zur Separation der Tantalkondensatoren betreiben und Zugriff auf relativ einfach zugängliche, große Mengen tantalreicher Leiterplatten haben

3. Zwischenlagerung bis Recyclingtechnik verfügbar

Für die Rückgewinnung von Sondermetallen wie Neodym oder Indium aus Post-Consumer-Abfällen stehen derzeit in Deutschland keine ausreichenden großtechnischen Recyclingkapazitäten zur Verfügung. Neben der Entwicklung geeigneter Verwertungstechniken ist eine wichtige Voraussetzung für Investitionen in eine industrielle Recyclinganlage die Generierung relevanter Mengen an sondermetallhaltigen Abfällen. Ein denkbarer Ansatz zur Schaffung der erforderlichen Mengenströme und zur

Überbrückung der Zeit, bis die Anlagenkapazität zur Verfügung steht, ist die Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Abfallströme.

3.1 Lagergestaltung und Anforderungen an einzulagernde Abfälle

Um die Lagergestaltung zu konzipieren, wurden Anforderungen an die einzulagernden Abfälle definiert, insbesondere:

- Geeigneter Grad der Separation bzw. Aufbereitung vor der Einlagerung (z.B. Poliermittel: entwässert)
- Mindestkonzentration des künftig zurückzugewinnenden Sondermetalls (z.B. Leuchtstoffe: 1% Seltenerdmetalle)
- Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien, Komponenten, Störstoffe oder Schadstoffe (z.B. Leuchtstoffe: Glas, Quecksilber)
- Abwägung zwischen Vorbehandlungs- und Aufkonzentrierungsaufwand sowie Lageraufwand (z.B. NdFeB-Magnete: mit / ohne Rotoren)
- Zustand bei der Einlagerung (z. B. Aggregatzustand, Korngröße, Magnetisierung, evtl. Konditionierung) (z.B. NdFeB-Magnete: entmagnetisiert oder abgeschirmt)
- Eigenschaften der Abfälle (Zusammensetzung, Gefahrenpotenzial, Stoffverhalten (z. B. Auslaug- oder Emissionsverhalten), maximal tolerierbare Schadstoffgehalte) (z.B. indiumhaltige Glasfraktionen: kann toxische Schwermetalle enthalten)
- Darstellung und Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen an den Input der in Entwicklung befindlichen Verfahren soweit bekannt (in der Regel nicht bekannt)

Der Mindest-Zeitbedarf für den Aufbau von Verwertungsverfahren wurde für die verschiedenen Abfallströme wie folgt abgeschätzt:

- NdFeB-Magnete: überwiegend mehr als 10 Jahre.
- Cer-/lanthanhaltige Poliermittel: 2 Jahre.
- Separierte indiumhaltige Glasfraktionen aus der Aufbereitung von LCD: 5 Jahre.
- Leuchtstoffe: 1-2 Jahre.
- NdFeB-Magnete: Mengen- und Umweltentlastungspotenzial im Abfall werden derzeit dominiert von IT-Produkten (Festplatten, Kopfhörern und Lautsprechern) sowie Fahrzeug- und Industriemotoren. Bis 2027 kann etwa mit einer Verdreifachung der Gesamt-Einsatzmenge an NdFeB-Magneten in den verschiedenen Anwendungen gerechnet werden. Magnete können unabhängig von ihrer Herkunft unter gleichen Bedingungen eingelagert werden, sofern die Abfälle nach Quellen nachvollziehbar getrennt gehalten werden, um einem späteren Verwerter ein gezielteres Vorgehen zu ermöglichen.
- Leuchtstoffe: Das Umweltentlastungspotenzial ist etwa eine Größenordnung kleiner als das der übrigen Gruppen. Den größten Beitrag leisten Leuchtstofflampen. Es ist von künftig sinkenden Einsatzmengen auszugehen. Leuchtstoffe können unabhängig von ihrer Herkunft unter gleichen Bedingungen eingelagert werden, sofern die Abfälle nach Quellen nachvollziehbar getrennt gehalten werden, um einem späteren Verwerter ein gezielteres Vorgehen zu ermöglichen.
- Cer-/lanthanhaltige Abfallströme: Bei allen untersuchten Abfallströmen wird von künftig weitgehend unveränderten Einsatzmengen ausgegangen. Der Aufbau eines Rückgewinnungsprozesses ist angesichts des geringen Materialwertes von Cer und Lanthan sowie der absehbar stabilen Preislage nicht zu erwarten. Einzig für Poliermittel wurde trotz der geringen Menge die Zwischenlagerung geprüft, denn hier besteht aufgrund der hohen Zielmetallkonzentration

nen die Option einer kostengünstigen Verwertung durch Einsatz in Keramikindustrie und Gießereien.

- **Indiumhaltige LCD-Schichten:** Dieser Abfallstrom weist trotz der eher geringen Menge ein vergleichsweise hohes, mit dem Leitparameter Carbon Footprint angenähertes Umweltentlastungspotenzial auf. Die Indium-Einsatzmengen in diesem Bereich werden sich bis 2035 voraussichtlich etwa verdoppeln.

3.2 Rechtliche Randbedingungen der Zwischenlagerung

Die Zwischenlagerung von Abfällen vor der weiteren Entsorgung unterliegt unterschiedlichen abfall-, immissionsschutz- und baurechtlichen Anforderungen. Neben der Unterscheidung der Art und Menge des zwischenzulagernden Abfalls spielt die Dauer der Zwischenlagerung eine entscheidende Rolle.

Die deponierechtlichen Anforderungen an die Zwischenlagerung von sondermetallhaltigen Abfällen greifen ein und konkretisieren die immissionsschutzrechtlichen Pflichten, sobald Abfälle zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. Abfälle zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr zwischengelagert werden sollen. § 23 Abs. 1 Deponieverordnung („DepV“) fordert in diesen Fällen den Nachweis der anschließenden ordnungsgemäßen Entsorgung. Soweit Anlagen zur Verwertung von sondermetallhaltigen Abfällen noch nicht abschließend geplant bzw. gebaut sind, kann ein solcher Verwertungsnachweis durch den Betreiber des Zwischenlagers regelmäßig nicht beigebracht werden. Aus diesem Grund könnte der Gesetzgeber neue gesetzliche Ausnahmeschriften in der Deponieverordnung schaffen, welche sondermetallhaltige Abfälle von dieser deponierechtlichen Nachweispflicht befreien. Es steht zu erwarten, dass eine solche Änderung der deponierechtlichen Nachweispflicht auch Auswirkungen auf die behördliche Genehmigungspraxis der Zwischenlagerung von Abfällen nach anderen Regelwerken (Immissionsschutzrecht, Abfallrecht, Baurecht) zeitigen wird.

Eine gesetzliche Bevorratungspflicht für bestimmte Edel- und Sondermetalle wäre nur bei einer Änderung der europäischen und deutschen Rohstoffstrategie denkbar. Zudem müsste die Bevorratungspflicht dem Verhältnismäßigkeitsprinzip genügen.

Ein Langzeitzwischenlager für Sondermetalle kann sowohl von öffentlich-rechtlichen Trägern (z.B. Finanzierung über Abfallgebühren) als auch privaten Trägern oder gemeinsam betrieben werden. Der Gesetzgeber hat die Möglichkeit, Pflichten, wie z. B. Finanzierungsverpflichtungen von Herstellern sondermetallhaltiger Produkte, in einer separaten Rechtsnorm zu regeln. Als Rechtsgrundlage einer Rechtsverordnung kommt § 25 KrWG in Betracht.

Gegenwärtig gibt es keine stoffstromspezifischen Andienungs- oder Verwertungspflichten für sondermetallhaltige Abfälle. Eine Pflicht zur Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Fraktionen lässt sich insbesondere nicht aus den derzeitigen Separationspflichten oder Recyclingquoten nach ElektroG und AltfahrzeugV ableiten. Dafür müssten konkrete Separations- und Verwertungspflichten für die sondermetallhaltigen Fraktionen rechtlich festgelegt werden (vgl. dazu bereits unter 2.2).

3.3 Bewertung der Zwischenlagerung

Mindestens bis zur Inbetriebnahme des aufzubauenden Verwertungsprozesses wird die eingelagerte Menge des sondermetallhaltigen Abfalls wachsen. Danach wird der zeitliche Ablauf des Mengenabrufs von vielen Faktoren abhängen, etwa von den Abgabekonditionen, der Qualität des Materials, den erzielbaren Erlösen und der Verfügbarkeit aus anderen Quellen. Die Langzeitzwischenlager müssen für eine maximale Einlagerungsmenge ausgelegt sein, die sie aber voraussichtlich nur für einen relativ kurzen Zeitraum erreichen werden. Die maximale Lagerkapazität wird bei mehreren Jahresmengen liegen. Die Investitionskosten für ein autonomes Lager mit 1.000 m² Lagerfläche mit zusätzlichen Neben- und Verkehrsflächen werden mit etwa einer Million Euro abgeschätzt. Die zusätzlich anfallenden Betriebskosten dürften bei etwa 100.000 € jährlich liegen. Ein weiterer maßgeblicher Kostenfaktor

sind die Aufwände für die Bearbeitung des einzulagernden Materials, also etwa die Demontage (und Entmagnetisierung) der einzulagernden NdFeB-Magnete.

4. Ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad von Edel- und Sondermetallen

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte ein Werkzeug zur groben Abschätzung ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrade entwickelt werden, das mit vertretbarem Aufwand anwendbar ist. Der Rückgewinnungsgrad ergibt sich aus einer Abfolge von Ausbeuten über die Prozessschritte der Recyclingkette von der Erfassung über die Separation und die Aufbereitung bis zur Rückgewinnung. Für jeden Prozessschritt bestehen zwischen der Höhe des Rückgewinnungsgrads und jeder Kennzahl zur ökologischen Bewertung unterschiedliche Abhängigkeiten, die die gesamte Spannbreite von linear bis hoch exponentiell annehmen können. Zudem sind die Abhängigkeiten jeweils an definierte Prozesse etwa der Erfassung oder Aufbereitung gekoppelt. Auch wenn eine Herleitung solcher Abhängigkeiten mit entsprechend großem Daten- und Kalkulationsaufwand theoretisch möglich wäre, würde ein Werkzeug, das mit solchen Modellen arbeitet, die Genauigkeit nur vorspiegeln. Zudem würde es ihm aufgrund der immensen Komplexität an Transparenz und Praxistauglichkeit mangeln.

Stattdessen wurde daher ein Werkzeug entwickelt, das eine Abschätzung und Einordnung realistischer erreichbarer Rückgewinnungsgrade ermöglicht. Hierzu erfolgt eine Identifikation und qualitative bis halbquantitative Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung des Rückgewinnungsgrades hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität und Effizienz mittels Nutzwertanalyse in einem Tabellenkalkulations-Tool. Die zugrundeliegende Bewertungsmethode umfasst sieben Stufen:

1. Definition der Ausgangsparameter für jede Teilmenge eines Abfallstroms (z.B. Gehalt an Zielmetallen)
2. Gliederung des Ausgangsprozesses in vier Verfahrensschritte (Erfassung, Separation, Aufbereitung, Rückgewinnung) sowie Abschätzung der derzeitigen Ausbeute pro Verfahrensschritt
3. Verbesserungsansätze
 - a) Sammlung von Maßnahmenoptionen (Verbesserungsansätzen) zu den einzelnen Verfahrensschritten,
 - b) Abschätzung der Verbesserung der Ausbeute pro Verfahrensschritt
4. Qualitative/halbquantitative Bewertung der Maßnahmenoptionen hinsichtlich 6 Parametern, die untereinander zu gewichten sind: Umweltbelastungen durch die Maßnahme (Global Warming Potential, Toxikologie), Energieverbrauch (Kumulierter Energieaufwand), Effekt auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien sowie Machbarkeit (Realisierungschancen, Realisierungsaufwand)
5. Überführung der qualitativen Bewertung jeder Maßnahmenoption in einen Zahlenwert sowie Ranking der Maßnahmenoptionen innerhalb der Verfahrensschritte
6. Verrechnung der Zielmetall-Ausbeuten der Maßnahmenoptionen, die innerhalb der Verfahrensschritte am besten abgeschnitten haben, mit ihren Neuwarenwerten sowie der Menge an Treibhausgasen, die für die Primärproduktion der zurückgewonnenen Zielmetalle freigesetzt worden wären.
7. Gesamtbewertung

Das Tabellenkalkulations-Tool wurde exemplarisch auf zwei Beispiele angewendet.

Leiterplatten aus Altfahrzeugen:

In der Ausgangssituation für diesen edelmetallhaltigen Abfallstrom (Annahme: 1.000 t Leiterplatten/a mit steigender Tendenz bei zugleich sinkendem Edelmetallgehalt) wird davon ausgegangen, dass derzeit die betrachteten Zielmetalle Gold, Silber, Palladium und Platin über die Recyclingprozesskette für

Altfahrzeuge vollständig verloren gehen. Durch Umsetzung verschiedener Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze in den Verfahrensschritten mit realistisch abgeschätzten Ausbeutesteigerungen kann für den gesamten Recyclingprozess ein Rückgewinnungsgrad (Gesamtausbeute) von 5,9 % erzielt werden. Das entspricht Einsparungen

- an treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 227.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 3,3 Mio. MJ sowie
- an Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 566.000 €.

Tabelle 2: Angenommene Ausbeuten im edelmetallhaltigen Abfallstrom „Leiterplatten aus Altfahrzeugen“

Verfahrensschritt	Ausgangssituation	Nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze	
		bei realistisch abgeschätzten Ausbeuten	bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeuten
Erfassung	50 %	52 % (Werbung, Öffnungszeiten etc.)	85 %
Vorseparation	0 %	40 % (Ausweitung manueller Demontage)	60 %
Aufbereitung	0 %	30 % (Prallmühle und Sortierschritt)	85 %
Verwertung	95 %	95 % (Kupferhütte)	96 %
GESAMT	0 %	5,9 %	41,6 %

Mit sehr optimistischen Annahmen hinsichtlich der Steigerung der Ausbeuten für die gleichen Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze ergibt sich ein Rückgewinnungsgrad von knapp 42 %.

Abfallstrom NdFeB-Magnete:

In der Ausgangssituation für diesen seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom (Abschätzung: 402 t NdFeB-Magnetmaterial/a im Jahr 2020 mit steigender Tendenz) wird davon ausgegangen, dass derzeit die betrachteten Zielmetalle Dysprosium, Neodym und Praseodym während der Recyclingprozesskette vollständig verloren gehen. Durch Umsetzung verschiedener Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze in den Verfahrensschritten des Recyclingprozesses mit realistisch abgeschätzten Ausbeutesteigerungen kann ein Rückgewinnungsgrad (Gesamtausbeute) von 6,8 % erzielt werden, siehe Tabelle 3. Das entspricht Einsparungen

- an treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 258.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 5,85 Mio. MJ sowie
- an Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 675.000 €.

Tabelle 3: Angenommene Ausbeuten aus dem seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom „NdFeB-Magnete“

Verfahrensschritt	Ausgangssituation			Nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze					
				bei realistisch abgeschätzten Ausbeuten			bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeuten		
	IM	IT	AF	IM	IT	EF	IM	IT	EF
Erfassung	30 %	50 %	50 %	30 %	65 %	52 %	60 %	70 %	85 %
Vorseparation	0 %	0 %	0 %	50 %	20 %	30 %	70 %	85 %	80 %
Aufbereitung	0 %	0 %	0 %	50 %	60 %	60 %	85 %	80 %	80 %
Verwertung	0 %	0 %	0 %	85 %	85 %	85 %	90 %	90 %	90 %
GESAMT	0 %			6,8 %			42,3 %		

IM = Magnete aus Industriemotoren (60 t/a = 15 % der betrachteten Gesamtmenge)

IT = Magnete aus IT (275 t/a = 68 % der betrachteten Gesamtmenge)

AF = Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw (67 t/a = 17 % der betrachteten Gesamtmenge)

Mit sehr optimistischen Annahmen hinsichtlich der Steigerung der Ausbeuten für die gleichen Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze ergibt sich ein Rückgewinnungsgrad von etwa 42 %.

5. Implementierung der Maßnahmen zur Stärkung des Recyclings von Edel- und Sondermetallen

Die im Projekt entwickelten Maßnahmenoptionen wurden qualitativ bewertet mit Blick auf Steigerung der zurückgewonnenen Menge Zielmetalle, Grad der Verbindlichkeit, Realisierungschancen, Realisierungsaufwand und Effekte auf die Verwertung anderer Metalle.

5.1 Seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe

Zur Stärkung des Recyclings seltenerdmetallhaltiger Magnetwerkstoffe, die in Elektro- und Elektronikgeräten bzw. Altfahrzeugen enthalten sind, könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Kennzeichnungspflicht

Kennzeichnung von Motoren (oder anderen Anwendungen) z.B. auf dem Typenschild, die Einzelmagnete größer als z.B. 20 g enthalten oder eine Gesamtmenge größer als z.B. 200 g. Der Kennzeichnungscode gibt den Magnettyp an (z.B. NdFeB), ggfs. erweitert mit Angabe aller in Anteilen von mehr als 1 Gew.-% enthaltenen Seltenerdmetalle (z.B. NdPrDyFeB). Zu prüfen wäre, ob die Kennzeichnung auch eine Unterscheidung von polymergebundenen und Sinter-Magneten ermöglichen sollte.

Zu prüfen: Die Möglichkeit der Einführung einer Kennzeichnungspflicht, z. B. über das ElektroG bzw. die WEEE-RL oder über auf die Ökodesign-Richtlinie gestützte europäische Durchführungsmaßnahmen bzw. für Motoren über die Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren („Motorenverordnung“); soweit zweckmäßig auch die Ausweitung auf weitere Produkte.

Hinweis: Ggfs. Kennzeichnungspflicht für alle Permanentmagnettypen, damit auch der vermehrte Einsatz anderer seltenerdmetallhaltiger Magnettypen erfasst wäre und Ausweichbewegungen durch Wechsel des Magnettyps vermieden würden bzw. nachvollziehbar sind.

Hinweis: Bei automatischer Sortierung könnte die Kennzeichnung sehr einfach gehalten werden (z.B. NdFeB).

- M 2: Ausbau-, Verwertungs- und Informationspflicht

Für Motoren bzw. Geräte mit nicht motorengelassenen Magneten, die als NdFeB-haltig erkennbar (z.B. in Festplatten) oder, wie unter M 1 beschrieben, gekennzeichnet sind, Ausbaupflicht und Verpflichtung, die ausgebauten Magnete einer Verwertung zuzuführen, durch die Seltenerdmetalle aus Primärrohstoffen ersetzt werden.

Verankert werden könnten die Verpflichtungen für Elektroaltgeräte in der WEEE-RL (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) und für Altfahrzeuge in der EG-Altfahrzeugrichtlinie (Anhang I Nr. 4) bzw. in der deutschen Altfahrzeugverordnung.

Sollten dort Anforderungen für das Ausschleusen von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen festgelegt werden, müssen die Hersteller entsprechende Demontagehinweise zur Verfügung stellen. Zu prüfen: Ausbau bestehender Initiativen zur Etablierung einer zentralen, ggf. internetbasierten Demontagehinweisedatenbank (www.i4r-platform.eu).

Hinweis: Eine Pflicht zum Ausbau ist nur dort zielführend, wo eine Kennzeichnungspflicht besteht oder z. B. aufgrund der Demontagehinweise das Vorhandensein von NdFeB-Magneten bekannt ist. Gegebenenfalls kann in die genannten Regelwerke eine Formulierung aufgenommen werden wie „... sind auszubauen aus Geräten, die entsprechend gekennzeichnet sind oder bei denen das Vorhandensein NdFeB-haltiger Magnete allgemein bekannt ist“.

- M 3: Verpflichtung zum verwertungsgerechten Design

Zu prüfen: Erscheint eine Vorgabe „Magnete müssen mit einfachen Mitteln unzerstört ausgebaut werden können“ unter Abwägung aller Gesichtspunkte vertretbar (mögliche Zielkonflikte mit Energie- und Materialeffizienz)? Wenn ja: Prüfung der Möglichkeiten zur Verpflichtung der Hersteller bzw. Importeure der sondermetallhaltigen Elektro- und Elektronikgeräte bzw. Fahrzeuge. Wenn eine solche Vorgabe nicht vertretbar ist, dann muss auch die Verpflichtung zum Ausbau eingeschränkt werden, z.B. „Ausbau, sofern technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und unter Beachtung der sozialen Folgen“. Ob der Aufwand vertretbar ist, könnte in technischen Leitlinien anhand von Kriterien oder Bauteillisten beschrieben und regelmäßig aktualisiert werden.

- M 4: Verwertungsquote

Einführung einer speziellen sondermetallbezogenen Verwertungsquote mit Bezug auf die der Verwertung zugeführte Menge: allenfalls mit großem Aufwand zu überwachen, denn hierzu müssten sowohl die separierten und der Verwertung zugeführten Mengen als auch die Ausbeuten der Verwertungsprozesse ermittelt und zusammengeführt werden (vgl. daher die Möglichkeit einer entsprechenden Anpassung der Mitteilungspflichten in ElektroG und AltfahrzeugV).

- M 5: Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern

Für NdFeB-Magnete oder Teile, die z.B. zu mindestens 10% aus NdFeB-Magneten bestehen; Möglichkeit zur Einrichtung und Unterhaltung privatwirtschaftlich betriebener Langzeitzwischenlager, dazu Änderungen der Anforderungen an die Langzeitlagerung in § 23 DepV.

- M 6: Bündelungsworkshops

Unter Einbeziehung von Demontagebetrieben, Aufbereitern und für Demontagebetriebe (auch in anderen Feldern) tätigen Logistikern und Verwertern, siehe auch Abschnitt 5.8 der Zusammenfassung.

- M 7: Förderung der Entwicklung von Transport- und Behältersystemen für NdFeB-Magnetabfälle

Ausschreibung eines Forschungsprojekts unter Beteiligung von Praxispartnern; Schritt 1: Prüfung der Eignung von Systemen, die zur Bereitstellung von Neu-Magneten eingesetzt werden.

- M 8: Initiierung Erfassungs- und Demontagenetzwerk für Elektrofahrräder

Anstoßen einer freiwilligen Kooperation zwischen Fahrrad-Herstellern, -Händlern und -Verwertern z.B. durch einen Workshop.

Des Weiteren kommen übergeordnete Maßnahmenoptionen in Frage, siehe Abschnitt 5.8 der Zusammenfassung.

Bewertung der Maßnahmenoptionen:

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Die Maßnahmen M 1, 2, 3 und 4 würden über das bislang in der WEEE-RL bzw. der Altfahrzeug-Richtlinie festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher ist eine Anpassung der europäischen Regelwerke erforderlich und/oder eine Verschärfung der deutschen Vorschriften. Eine überschießende deutsche Umsetzung wäre aufgrund der Ziele der WEEE-Richtlinie und der Altfahrzeug-Richtlinie RL, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grundsätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Zusätzliche Mitteilungspflichten im Rahmen von M 4 müssten ferner im Einklang mit Durchführungsrechtsakten der Kommission zur Festlegung eines einheitlichen Formats der Registrierung und der Häufigkeit der Berichterstattung nach Art. 16 Abs. 3 WEEE-RL stehen.

Im Rahmen von M 5 wäre ferner zu beachten, dass die WEEE-RL eine Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Die Zwischenlagerung der sondermetallhaltigen Bauteile stellt auch kein Recycling im Sinne der Altfahrzeug-Richtlinie dar. Daher wäre ein Tätigwerden des europäischen Gesetzgebers erforderlich, wenn die Verwertungs- bzw. Recyclingdefinition auch die Zwischenlagerung umfassen soll.

Die Regelung der Maßnahmen nach M 1 und M3 sowie die Demontagehinweise nach M2 wären auf europäischer Ebene auch in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG denkbar.

Fazit: Als wirksame Maßnahmen mit hoher Verbindlichkeit stellen sich M2 in Kombination mit M1 dar, die durch M3 und/oder M4 zusätzlich gestärkt werden könnten. Insbesondere der Realisierungsaufwand für M3 und M4 ist jedoch recht hoch. Maßnahmen mit insgesamt günstigen Bewertungen, die mit geringem Aufwand zu realisieren wären, sind M6 und M8. Beide Maßnahmen haben zudem positive Effekte auf die Verwertung anderer Metalle. Der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch deutlich geringer.

5.2 Edelmetallhaltige Leiterplatten und Lambdasonden aus Altfahrzeugen

Zur Stärkung der Rückgewinnung von Edelmetallen aus Fahrzeugelektronik könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Designvorgaben an die Fahrzeugindustrie

Verpflichtung zum demontagegerechten Einbau (s. z.B. VDI Richtlinie 2243: recyclingorientierte Produktentwicklung) größerer Elektronikkomponenten in Fahrzeuge; Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie und in der AltfahrzeugV, ggfs. in Form zusätzlicher bzw. ergänzter Anhänge; nur zielführend in Kombination mit einer Ausbauverpflichtung für Altfahrzeug-Demontagebetriebe.

Eingrenzung auf relevante Komponenten, um unangemessenen Aufwand zu vermeiden; als erste Grundlage einer Auswahl-Orientierung könnte die Separationsempfehlung von Groke et al. (Groke et al. 2017) dienen.

Zu prüfen: Zuvor sollte geprüft werden, in welchem Umfang Konflikte mit den Designzielen Gewichtsreduzierung und Materialeffizienz auftreten können.

- M 2: Ausbau-, Verwertungs- und Informationspflicht

Verpflichtung zum Ausbau größerer Fahrzeugelektronik-Komponenten aus Altfahrzeugen und zur Zufuhr zu einem Verwertungsprozess, bei dem Leiterplatten abgetrennt und der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden; Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie, Anhang I (Technische Mindestanforderungen für die Behandlung) Nr. 4 (Behandlung zur Verbesserung des Recycling) bzw. in der AltfahrzeugV im Anhang.

Soweit neue Anforderungen an die Ausschleusung von edelmetallhaltigen Bauteilen aus Altfahrzeugen im Rahmen der Demontage gesetzlich festgelegt werden sollten, würde dies auch bedeuten, dass die Hersteller den Demontagebetrieben entsprechend ergänzte Demontagehinweise zur Verfügung stellen müssen, aus denen sich ergibt, wie diese edelmetallhaltigen Bauteile ausgebaut werden können.

- M 3: Altfahrzeugrücklauf verbessern

Steigert das Potenzial zur Rückgewinnung von Edelmetallen sowohl im Falle der Demontage edelmetallhaltiger Teile als auch – mit deutlich schlechteren Ausbeuten - beim Schreddern noch in den Altfahrzeugen enthaltener, nicht demontierter Bauteile.

- M 4: Postschredderoptimierung

Förderung von Projekten zur Verbesserung der Edelmetallausbeute (wie auch der Ausbeute weiterer Metalle wie z.B. Stahl, Kupfer und Aluminium) aus Schredderfraktionen im Falle nicht demontierter edelmetallhaltiger Bauteile; z.B. durch Ausschreibung eines Forschungsprojekts unter Beteiligung von Praxispartnern.

- M 5: Bündelungs-Workshops

Im Rahmen von Bündelungsworkshops werden Möglichkeiten erarbeitet, bestehende Netzwerke zu nutzen und auszubauen, siehe auch Abbildung 2: Sinnvoll könnte das Zusammenbringen von Demontagebetrieben (und ggf. weiteren Betrieben mit ähnlichen Abfällen aus anderen Branchen) mit deren potenziellen Abnehmern und Logistikern zur Erweiterung bestehender oder zur Entwicklung neuer Netzwerke sein. Ziel ist es, dass entsprechende Vereinbarungen getroffen werden, um bereits etablierte Abholbeziehungen zu nutzen und neue Verbindungen aufzubauen.

- Übergeordnete Maßnahmen

Des Weiteren können übergeordnete Maßnahmenoptionen für Altfahrzeug-Demontagebetriebe die Effizienz der betriebsinternen und der betriebsübergreifenden Logistik steigern, insbesondere die Entwicklung und Einführung eines Recycling-Warenwirtschaftssystem (RWWS), eventuell unterstützt durch ein Füllstanderfassungssystem, sowie die Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“, siehe Abschnitt 5.8 der Zusammenfassung.

Bewertung der Maßnahmenoptionen:

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Die Maßnahmen M 1 und 2 würden über das bislang in der Altfahrzeug-Richtlinie festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher wäre eine Anpassung der europäischen Regelwerke erforderlich und/oder eine Verschärfung der deutschen Vorschriften. Eine solche überschießende Umsetzung wäre aufgrund der Ziele der Altfahrzeug-Richtlinie RL, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grund-

sätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Fazit: Die einzige wirksame Maßnahme mit hoher Verbindlichkeit bei insgesamt günstiger Bewertung ist M2. Hier ist der Realisierungsaufwand jedoch recht hoch. Die Maßnahmen M3, M4 und M5 weisen insgesamt günstige Bewertungen auf. Auch diese Maßnahmen haben positive Effekte auf die Verwertung anderer Metalle, der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch eher gering.

5.3 Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren

Zur Stärkung der Rückgewinnung von Edelmetallen aus Umweltkatalysatoren könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Round-Table-Gespräch mit Katalysatorherstellern und Katalysatoranwendern

Diskussion von Möglichkeiten einer besseren Information der Anwender (z.B. über QR-Code) und eines Ausbaus der Rücknahmemöglichkeiten.

- M 2: Einführung einer gesetzlichen Pflicht zur getrennten Sammlung

Z. B. im Rahmen einer gesetzlichen Regelung zur abfallrechtlich erweiterten Produktverantwortung der Hersteller und Vertreiber von Umweltkatalysatoren (inklusive Getrennthaltungs- und Rücknahmepflichten), oder, soweit die Umweltkatalysatoren als gewerbliche Abfälle anfallen: Erweiterung der Gewerbeabfallverordnung mit Getrennthaltungspflichten der Endnutzer der Umweltkatalysatoren.

Bewertung der Maßnahmenoptionen:

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Bei der Umsetzung der Maßnahmen nach M 2 in einer Rechtsvorschrift auf Grundlage des deutschen KrWG oder in der Gewerbeabfallverordnung wären die Vorgaben der Abfallrahmen-RL zu beachten, insbesondere zur Abfallhierarchie des Art. 4 Abfallrahmen-RL und zur erweiterten Produktverantwortung in Art. 8 f. Abfallrahmen-RL. Bei Beachtung dieser Grenzen wären keine Änderungen des europäischen Rechts erforderlich.

Fazit: M2 weist eine gute Wirksamkeit bei hoher Verbindlichkeit und insgesamt positiver Bewertung auf. M1 hat eine geringere Wirksamkeit und Verbindlichkeit, weist jedoch aufgrund des geringen Realisierungsaufwands eine insgesamt ebenfalls positive Bewertung auf. Belastbare Zahlen zum Edelmetallgehalt dieses Abfallstroms liegen nicht vor.

5.4 Cer- und lanthanhaltige Abfallströme

Die meisten betrachteten Abfallströme kommen für die Rückgewinnung von Cer und Lanthan nicht in Frage, weil ihre Konzentrationen und Einzelmengen zu gering sind. Auch dort, wo Mengen bereits gebündelt vorliegen (NiMH-Batterien, Schlacken aus der Aufbereitung von Autokatalysatoren) ist der ökologische und ökonomische Wert der enthaltenen Metalle zu gering, um aufwendigere Aktivitäten zur Rückgewinnung zu rechtfertigen.

Hinzu kommt, dass Cer und Lanthan bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen aus Erzen als eher geringwertige Nebenprodukte anfallen. Der Umfang der Bergbauaktivitäten wird vom Bedarf an hochwertigeren und in den Erzen geringer konzentrierten Metallen bestimmt. Dies führt dazu, dass Cer und Lanthan zu sehr viel niedrigeren und stabileren Preisen verfügbar sind als die übrigen Seltenerdmetalle. Versorgungsengpässe sind hier kaum zu erwarten. Auch der ökologische Rucksack von Cer und Lanthan ist vergleichsweise klein. Ein Recycling dieser Metalle ist damit nicht zweckmäßig, solange dafür aufwendige Verwertungsverfahren erforderlich sind.

In Poliermitteln tritt Cer in recht hohen Konzentrationen auf. Ein direkter Einsatz von Poliermitteln in Keramikglasuren oder Gießereien könnte bei geeigneter Qualitätssicherung mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich sein und würde dort Cer bzw. Lanthan aus dem Bergbau ersetzen.

Zur Steigerung des Recyclings von cer- und lanthanhaltigen Abfallströmen aus Poliermitteln könnte folgende Maßnahme zweckmäßig sein:

- M 1: Initiierung eines Workshops

Zusammenführen möglicher Beteiligter der Prozessketten zum Einsatz von Polierschlämmen in Keramikglasuren oder Gießereien.

Fazit: Die einzige Maßnahmenoption weist bei geringem Realisierungsaufwand eine insgesamt positive Bewertung auf.

5.5 Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe

Zur Aufbereitung der Leuchtstoffe zu Seltenerdmetallkonzentraten stehen Verfahren zur Verfügung, die derzeit aus Kostengründen nicht betrieben werden. Sollten die Prozesse wieder in Betrieb genommen werden, könnten die bereits separiert vorliegenden Mengen aus den bestehenden Aufbereitungsprozessen für Lampen und Geräte diesen Anlagen zugeführt werden. Darüber hinausgehende Maßnahmen sind aufgrund der geringen und zudem abnehmenden Menge nicht zweckmäßig. Zu diesen Abfallströmen werden keine Maßnahmenoptionen benannt.

5.6 Separierte indiumhaltige LCD-Schichten

Zur Stärkung der Rückgewinnung von Indium aus separierten LCD-Schichten könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Forschungsprojekt Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen

Initiierung eines Förderprojektes zur Umsetzung der Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen aus der Aufbereitung von LCD-Anzeigen in den Pilotmaßstab mit Erarbeitung fundierter Stoffstrom- und Wirtschaftlichkeitsbilanzen für den Produktionsmaßstab.

- M 2: Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern

Für separierte indiumhaltige LCD-Schichten. Möglichkeit zur Einrichtung und Unterhaltung privatwirtschaftlich betriebener Langzeitzwischenlager, dazu Änderungen der Anforderungen an die Langzeitlagerung in § 23 DepV.

- M 3: Verpflichtung zur separaten Sammlung und Verwertung indiumhaltiger Glasfraktionen

Verpflichtung der Erstbehandler, die indiumhaltige Glasfraktion aus der Aufbereitung von LCD-Displays separat zu sammeln und einem Verfahren zur Indium-Rückgewinnung zuzuführen; Verankerung könnte in der WEEE-Richtlinie (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) erfolgen.

Bewertung der Maßnahmenoptionen:

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Die Maßnahme M 3 würde über das bislang in der WEEE-RL festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher wäre entweder eine Anpassung der WEEE-RL erforderlich und/oder eine Änderung des ElektroG. Eine solche überschießende deutsche Umsetzung im ElektroG wäre aufgrund der Ziele der WEEE-Richtlinie, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grundsätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Im Rahmen von M 2 wäre ferner zu beachten, dass die WEEE-RL eine Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Daher wäre ein Tätigwerden des europäischen Gesetzgebers erforderlich, wenn die Verwertungsdefinition auch die Zwischenlagerung umfassen soll. Ferner könnte der deutsche Gesetzgeber durch eine Änderung der Anforderungen an eine Langzeitlagerung von Abfällen in § 23 DepV den Betrieb eines solchen Zwischenlagers vereinfachen.

Fazit: Die einzige Maßnahme mit hoher Wirksamkeit und Verbindlichkeit ist M 3. Diese Maßnahme hat eine insgesamt positive Bewertung. M1 hat ebenfalls eine insgesamt günstige Bewertung. Der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch eher gering.

5.7 Separierte Tantalkondensatoren

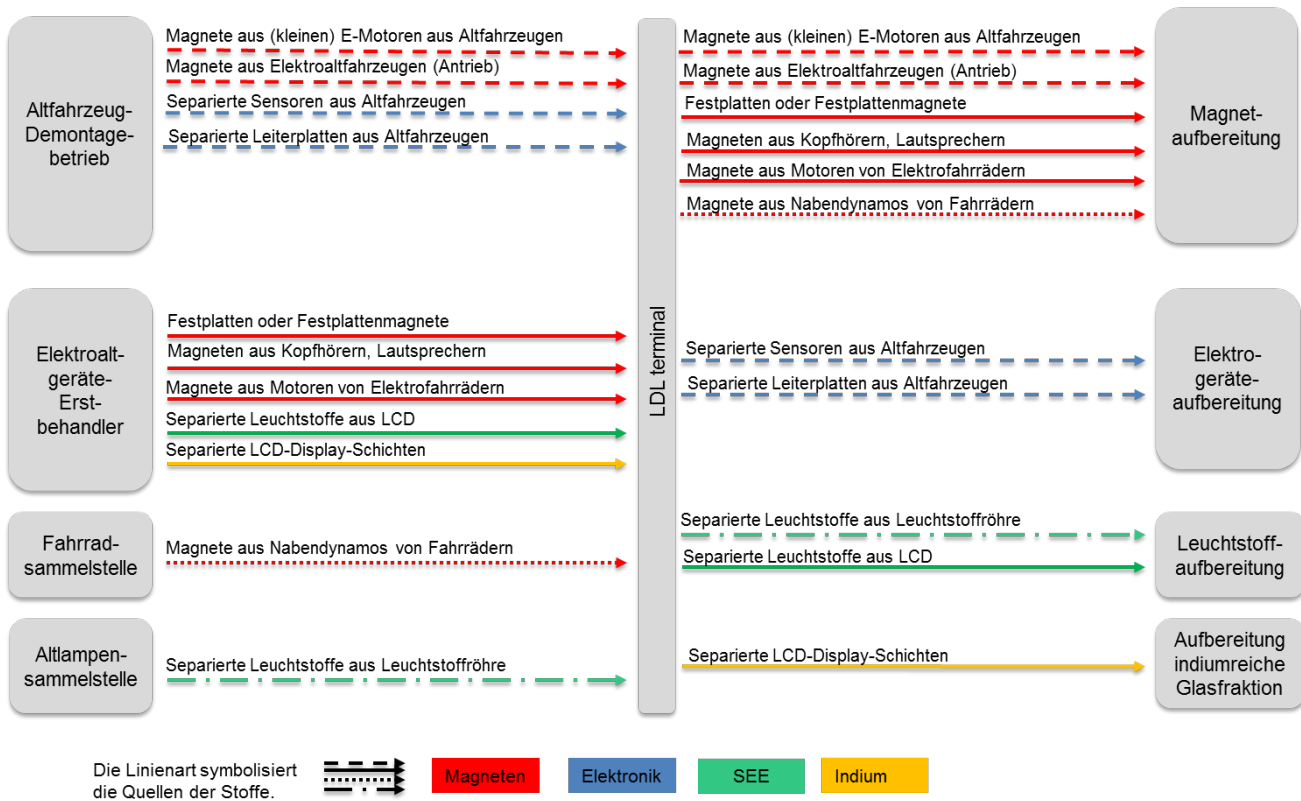
Grundsätzlich wäre eine Bündelung über Einbindung sämtlicher Erstbehandler möglich. Hierzu müssten diese aber hochwertige Leiterplatten aus der Hand geben, die sie schon heute gewinnbringend verkaufen. Der Anteil des Tantals am Gesamtwert ist dabei recht klein, bietet hierzu also kaum hinreichende Motivation. Zudem wäre ein nicht unerheblicher Sortieraufwand zur Separation von Leiterplatten mit relevanten Tantolgehalten erforderlich, der von möglichen Abnehmern der Leiterplatten kaum angemessen vergütet werden könnte. Eine Sortierung der Leiterplatten sollte daher von Unternehmen durchgeführt werden, die ggfs. selbst Anlagen zur Separation der Tantalkondensatoren betreiben. Solche Anlagen können Aussichten auf relativ einfach zugängliche große Mengen tantalreicher Leiterplatten bieten und, wenn sie einmal in Betrieb sind, weitere Mengen aus mit Blick auf die Zielmetalle interessanten Marktsegmenten anziehen. Zu diesem Abfallstrom werden keine Maßnahmen benannt.

5.8 Übergeordnete Maßnahmen zu Logistik und Bündelung

Über die zuvor für einzelne Abfallströme dargestellten spezifischen Maßnahmenoptionen hinaus bestehen weitere übergeordnete Handlungsmöglichkeiten zur Effizienzsteigerung der betriebsinternen und der betriebsübergreifenden Logistik, die auf die Abfall- bzw. Stoffstrombewirtschaftung in den Betrieben insgesamt, nicht nur speziell auf die edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme abzielen, aber dennoch positive Auswirkungen auf die Rückgewinnung der Zielmetalle aus den Abfällen haben können. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die im Bereich der Demontage und Verwertung angesiedelt sind:

- die Förderung der Entwicklung eines Recycling-Warenwirtschaftssystems (RWWS), betriebsintern und/oder betriebsübergreifend,
- die Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“,
- die Entwicklung und Verbreitung von Füllständerfassungssystemen, beispielsweise zur Unterstützung eines RWWS, sowie
- die stoffstromübergreifende Bündelung, siehe Abbildung 2, welche auf eine bessere Auslastung der logistischen Ketten bei Transporten zielt. Wird ein Umschlagpunkt (LDL-Terminal) zwischengeschaltet, ist die Bündelung weitgehend unabhängig von den Inhaltstoffen der transportierten Objekte. Die Bündelungspotenziale ergeben sich über die räumliche Nähe der Abholadressen bzw. nach dem Umschlagpunkt der Zieldestinationen. Dies lässt sich beispielsweise durch Bündelungsworkshops unterstützen.

Abbildung 2: Bündelungspotenziale ausgewählter Stoffströme.

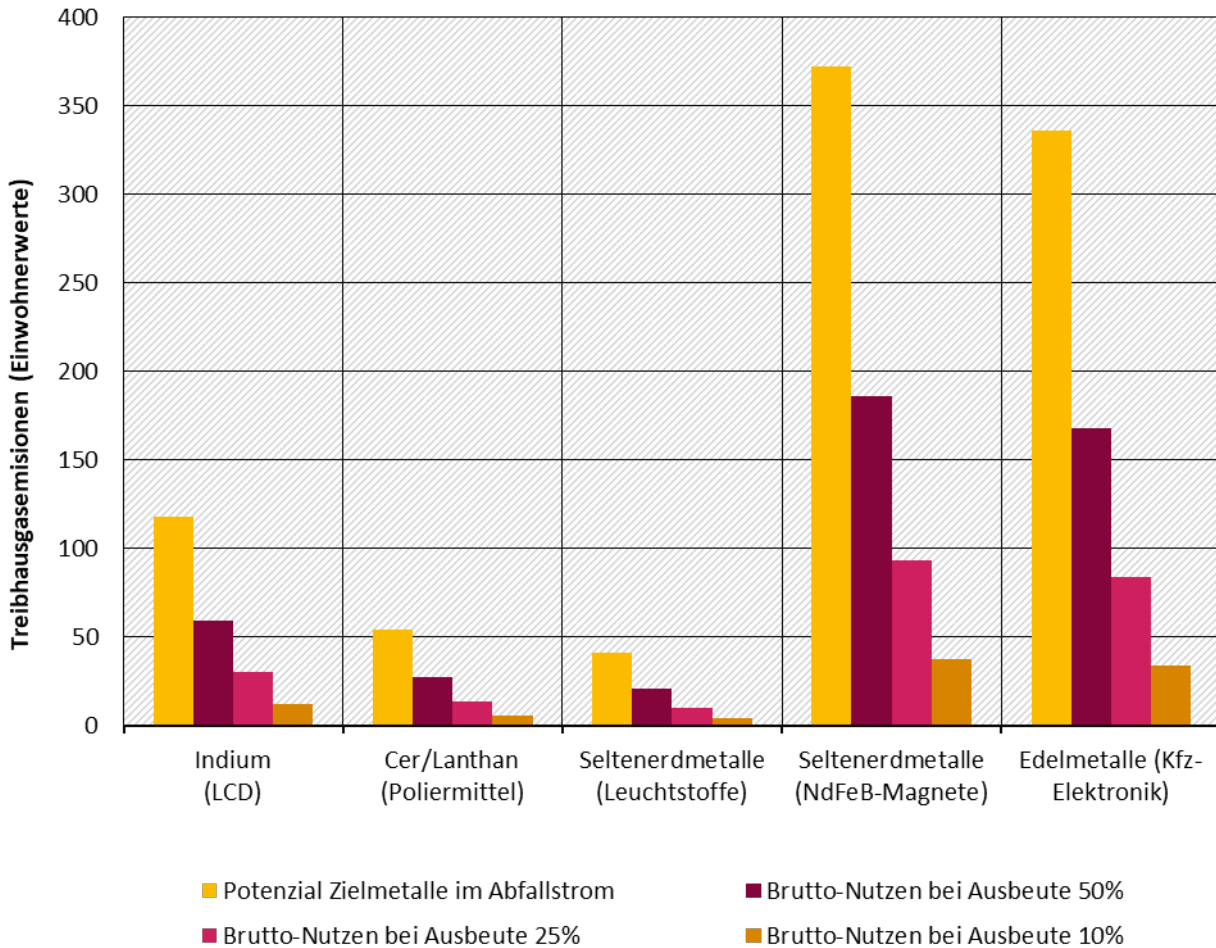


Daneben gibt es Maßnahmenoptionen, die auf einer höheren Ebene angreifen und selbstregulierende, von dynamischen technischen und ökonomischen Änderungen weitgehend unabhängige Wirkungen entfalten können. Hier sind zu nennen: Die Steigerung von Rücklaufmengen durch Stärkung des Vollzugs, die steuerliche Bevorzugung von Recyclingprozessen, Steuervorteile für Rezyklateinsatz oder Materialsteuer oder CO₂-Steuer auf Materialien aus Primärrohstoffen in Relation zu ihrem Carbon Footprint. Die Analyse und Bewertung dieser Maßnahmen ist nicht Gegenstand dieser Studie.

5.9 Angemessenheit von Maßnahmen

Der Aufwand für die Realisierung und Umsetzung von Maßnahmen zur Stärkung des Recyclings sollte in angemessenem Verhältnis zum erwarteten ökologischen Nutzen stehen. Daher wurde das Umweltentlastungspotenzial durch das Recycling der Zielmetalle in den betrachteten Abfallströmen, das sich durch die Vermeidung der Primärproduktion ergibt, anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen abgeschätzt (Abbildung 3).

Abbildung 3: Brutto-Umweltentlastungspotenzial der Zielmetalle in den betrachteten Abfallströmen durch Verzicht auf ihre Primärproduktion; dargestellt anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen (Angaben in Einwohnerwerten); Carbon Footprint Einwohnerwerte Deutschland: 11,4 t CO₂eq/a (Quelle: Umweltbundesamt 2018); Carbon Footprint Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).



Der mögliche ökologische Nutzen von Maßnahmen zur Verbesserung des Recyclings beschränkt sich auf den Anteil der aus diesem Potenzial tatsächlich zurückgewonnenen Metalle. Aufgrund unvollständiger Erfassung und von Verlusten entlang der Prozesskette kann die tatsächlich zu erwartende Ausbeute wesentlich geringer sein. Von diesem Brutto-Nutzen sind dann noch die Treibhausgasemissionen abzuziehen, die durch die Recyclingprozesse verursacht werden.

Selbst im Falle von NdFeB-Magneten und bei künftig erheblich steigenden Mengen wird zwar das Potenzial voraussichtlich auf bis zu wenige tausend Einwohnerwerte steigen. Der praktisch zu erwartende Nutzen mit Blick auf die Treibhausgasemissionen dürfte durch Exporte in Form von Gebrauchtgeräten, Verluste entlang der Verwertungskette und Treibhausgasemissionen aus der Verwertung allerdings dennoch auch in einigen Jahren einige Hundert Einwohnerwerte in Deutschland kaum übersteigen. Mindestens aus Sicht des Klimaschutzes erscheinen daher in Implementierung und Umsetzung aufwendige, gesetzgeberische Maßnahmen kaum angemessen.

Für die Frage nach der Angemessenheit von (rechtlichen) Maßnahmen zur Stärkung der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen sind neben dem Klimaschutz weitere Aspekte relevant, beispielsweise:

- Weitere Umweltbelastungen aus der Primärgewinnung der Metalle, hierzu gehören u.a. Emissionen radioaktiver Strahlung bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen oder Quecksilberemissionen aus dem Kleinbergbau von Gold.
- Die Versorgungssicherheit insbesondere mit kritischen Rohstoffen. Der Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017 (Europäische Kommission 2017) gehören unter anderem die im Projekt betrachteten Edel- und Sondermetalle Indium, Tantal, Platingruppenmetalle sowie Leichte Seltene Erden und Schwere Seltene Erden an. Im Kreislaufwirtschaftspaket (Europäische Kommission 2015, Seite 19) legt die EU-Kommission den Mitgliedstaaten nahe, das Recycling von kritischen Rohstoffen zu fördern. Das zunehmende Augenmerk der europäischen Abfallbewirtschaftung auf die kritischen Rohstoffe wird auch dadurch deutlich, dass sie seit Mai 2018 explizit in der Abfallrahmenrichtlinie adressiert werden, unter anderem, um die Abhängigkeit der Union von Ressourceneinfuhren zu verringern (Europäische Union 2018).
- Die Rohstoffsicherung insbesondere für zukünftig immer relevanter werdende Klimaschutztechnologien wie Photovoltaikanlagen, Windenergieanlagen oder Elektromobilität.
- Mittel- oder langfristig ist mit steigenden Mengen vieler der untersuchten Edel- und Sondermetalle in den Abfallströmen zu rechnen.

Auch bei der Bewertung dieser Aspekte sind jedoch die bei den meisten betrachteten Abfallströmen zu erwartenden erheblichen Verluste entlang der Verwertungskette zu berücksichtigen.

Dennoch sind weitere Aktivitäten zur Verbesserung bzw. Realisierung der Rückgewinnung der Zielmetalle aus den betrachteten Abfallströmen sinnvoll und wünschenswert. So kann in bestimmten Konstellationen, etwa bei direktem Zugriff eines Geräteherstellers oder Verwerter auf geeignete Abfallmengen eine Separation von Zielmetallen ökologisch und möglicherweise auch wirtschaftlich vorteilhaft sein - sofern in genau diesen Konstellationen Abnehmer für das gewonnene Material zur Verfügung stehen. Auch können ausgeprägte Preisspitzen bei hohem Bedarf gute Voraussetzungen zum Aufbau begrenzter Rückgewinnungsaktivitäten sein, weil vorübergehend Abnehmer auf internationalen Märkten auftreten. Und schließlich gelingt es einzelnen Akteuren immer wieder, kreative Lösungen für Teilmengen von Abfallströmen zu entwickeln. Zudem ist in einigen der genannten Felder nicht auszuschließen, dass einzelne Akteure eigeninitiativ umfassendere Lösungen aufbauen, und sei es, um auf diesem Wege andere, wirtschaftlich aussichtsreichere Aktivitäten zu stützen.

Gezielte und begrenzte staatliche Aktivitäten können hilfreich sein, wenn sie die Eigeninitiative der Beteiligten unterstützen. So können Akteure etwa in Form von Bündelungsworkshops oder Round-Table-Gesprächen zusammengebracht werden. Für die Teilnehmer kann das insbesondere dann interessant sein, wenn grundsätzliche Verbesserungen angestrebt sind, bei denen eine mögliche Rückgewinnung der hier betrachteten Metalle nur einer von vielen denkbaren positiven Effekten ist. Dies ist etwa der Fall bei der Entwicklung von Recycling-Warenwirtschaftssystemen oder bei der Entwicklung von Lean-Management-Handreichungen speziell für kleine und mittlere Unternehmen.

Gesetzgeberische Maßnahmen, die auf einer übergeordneten Ebene angreifen, können die Voraussetzungen für Eigeninitiative der Akteure verbessern. So führen Maßnahmen zur Verbesserung der vorschriftsmäßigen Erfassung von Altprodukten wie Altfahrzeuge oder Elektroaltgeräte zu größeren für interessierte Akteure greifbaren Mengen an Edel- oder Sondermetallen, insbesondere aber zu größeren Mengen an Massenmetallen. Die Schaffung einer Möglichkeit zur Langzeitzwischenlagerung geeigneter separierter Komponenten oder Materialien durch Verwerter trägt ebenfalls zur Ausweitung ihres Handlungsspielraums bei. Dies kann beim Aufbau von Lösungen helfen, und zwar nicht nur für die hier betrachteten Metalle.

Summary

1. Introduction

In Germany, special metals such as neodymium and other rare-earth metals (rare earths), indium and tantalum are currently not recovered from post-consumer waste, or only to very limited extents. This is partly because many of the products that contain such metals have not been on the market for very long, so that not only have large-scale, commercial recycling processes not yet been set up, but also the quantities of waste arising are still too small. Processes for the recovery of precious metals from waste have long been established on industrial scale. However, efficient collection and separation of these metals from waste streams, potentially with very low concentrations and from a large number of small sources, is a challenge. Very often, the concentration or quantity of precious and special metals in waste products is so low, that their collection or separation from waste streams is currently not economically viable.

The study largely focused on the following waste streams: neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets, vehicle electronics, environmental catalytic converters containing precious metals, waste streams containing cerium and lanthanum, phosphors containing rare-earth metals, LCD layers containing indium and tantalum capacitors. The study examined how, for these waste streams, new types of logistics concepts and approaches to intelligent organisation and the design of material and information flows can promote recycling. Technical, organisational and legal opportunities for longer-term interim storage of such wastes, until large-scale industrial recycling processes are available, were specified and assessed. Finally, ways of estimating an environmentally optimum recovery yield were worked up and measures for achieving more recycling were proposed and assessed.

2. Consolidation (Pooling) of waste streams containing precious and special metals

2.1 Collection logistics concepts and design of information flows

The business logistics is a scientific discipline, which does not follow a uniform paradigm. The management of flow systems is an understanding of logistics that is currently taking hold, which offers empirically verifiable, successful guidelines on strategic planning as well as tactical decisions and the operative control of logistics systems. In general, as a business discipline, logistics is orientated on efficiency increasing mechanisms, which were successfully established in industrialisation. Logistics sees value-adding processes or recycling processes as a network of connected players/companies, who implement the overall process together. The networks are represented in node and link models. Nodes represent, for example, warehouses, stores and companies and links represent the connecting supply relationships. Such a model visualises the network and provides information about the number and properties of the nodes, if applicable their location relative to each other and about the interconnection of the nodes (links) as well as their properties. Logistics networks are multi-level. The levels focused on here are the physical level of the goods and the informational level for control of the physical goods level. Improvements of logistics processes can take place on both levels, in which case they each have a reciprocal influence on each other. The financial level was also examined. This provides incentive and motivation for entrepreneurial action.

The challenges in pickup recycling logistics differ in several aspects from those of distribution logistics in providing value-adding chains. The challenges in recycling chains were therefore assembled generically on the named levels and the respective approaches to solutions were described in detail. Table 1 shows an overview of the challenges and solutions, structured according to steps in the recycling chain and network level.

Table 1: Challenges and solution approaches along a generic recycling chain

	Collection point	Sorting and dismantling	Recovery
Physical level	<p>Challenge: Problem of the first mile Time and material consolidation Organisation of container systems Fit-for-use handling in collection points</p> <p>Solution: Route planning for time (and material) consolidation as well as volume consolidation Shortening of the process stopping times</p>	<p>Challenge: Positioning of sorting and dismantling in the recycling chain Optimisation of manual processes to reduce unit labour costs</p> <p>Solution: Compilation and provision of dismantling information in the chain</p>	<p>Challenge: (Intralogistics) Storage close to production/treatment locations Storage of containers Logistical processing of co-products</p> <p>Solution: Allocation of supply and demand</p>
Informational level	<p>Challenge: Control of collection processes Triggering of pickups Quantity plannability Degrees of freedom for planning processes Reduction of stopping costs/stopping times</p> <p>Solution: Automation or partial automation of level indication Quantity plannability degrees of freedom for planning processes Digital spot market platform for pickup Notification to reduce stopping costs</p>	<p>Challenge: Identification of recoverables Information on accessibility for dismantling</p> <p>Solution: Auto-ID system for the identification of recoverables in components Open information platforms for information on the accessibility of the components Provision of validated dismantling instructions on (open) platforms</p>	<p>Challenge: (Control of the intralogistics) Planning of distribution of the products by allocating supply and demand</p> <p>Solution: Spot markets vs. cooperations</p>
Financial level / Motivation / Incentive	<p>Challenge: Legal obligations Economic attractiveness Interaction of both aspects</p> <p>Solution: Award at market prices to logistics service providers, who are able to increase potential consolidation effects</p>	<p>Challenge: Increase in economic attractiveness by structuring the learning curve</p> <p>Solution: Targeted use of the experience curve</p>	<p>Challenge: Revenue optimisation vs. customer loyalty Logistic expenditures for by-products</p> <p>Solution: (Spot markets vs. cooperations)</p>
Coordination tasks of logistics as a cross-disciplinary function			

The “first mile” of waste management logistics, in the same way as the “last mile” of distribution logistics, is particularly challenging. The “last mile” in logistics describes the transport to the customer’s

“front door” and is characterised by a large number of widespread delivery points with small quantities per delivery. The “last mile” share of the total delivery costs is correspondingly high. In the same way, in waste management logistics, the “first mile” of the waste, from the potentially numerous collection points / dismantling companies to the treatment plant, often with small quantities, is accompanied by large challenges.

If logistics is understood to be the management of flow systems, a significant efficiency gain lies in cross-company or cross-step coordination of process chains. Therefore, a model was also considered in which companies acting as system operators coordinate the entire logistics process, across all the individual steps. Several solution approaches indicated in the steps can be integrated into such a concept.

An essential pillar of logistics management is the availability of information. No, or very few, recycling chains currently exist for waste containing precious and special metals considered here. Accordingly, hardly any historical values are available. One proposal is therefore to support the establishment of a software-based system which, on setting up a recycling chain, collects and stores data on logistics processes (especially movement and quantity data), in order to enable data-based iterative process improvements. These can take place in-house, but also across companies and steps in the coordination of whole process chains.

Other solution approaches can be represented in the proposed software system (Recycling Enterprise Resource Planning system, RERP) to achieve more efficient handling of the logistics. For example, the measurement of levels in collection containers, which could then be used to control pickup processes and for the planning of future pickup processes.

Equally, the potential of logistical consolidation can be assessed far better, if historical values of generated quantities can be evaluated with spatial information and movement data, and can be used for consolidation efforts. As this information is not yet available in an evaluable form, consolidation/pooling workshops should be held with practitioners, enabling their empirical values to be used.

2.2 Legal aspects of the separation and labelling of waste streams containing precious and special metals

Obligations to dismantle components of waste electrical equipment or end-of-life vehicles containing precious or special metals can and should be arranged at national and/or European level. The corresponding regulatory instruments regarding waste electrical equipment and end-of-life vehicles provide the opportunity to establish additional recovery targets for components containing precious and special metals, which would have to be achieved by the manufacturers and/or the primary treatment plants/dismantling facilities.

In particular, it must be taken into consideration that the separation itself with subsequent interim storage of the components containing precious and special metals, cannot be classified as part of the recovery or entering a recovery process and therefore cannot be considered in the recovery rates according to the Electrical and Electronic Equipment Act (ElektroG). There is no statutory deadline on when the recovery must be completed. Hence, the actual recovery which takes place after an interim storage can be taken into account in the recovery rates.

As (almost) no components containing precious and special metals are recovered separately so far, and despite this, the required recovery rates are achieved, it is possible that separation itself with subsequent interim storage of individual components containing precious and special metals will not lead to problems in achieving the recovery targets in practice. However, if achievement of the recovery rate due to increased separation and interim storage of individual components or groups of components until they are actually and finally recovered should become problematic in practice, an amendment to the ElektroG would be one option so that interim storage, at least of components containing special metals would, by way of exception, be able to be classified as (possibly preliminary) recovery provided that the actual future recycling is assured. However, such an amendment to the national law is current-

ly not in accordance with the requirements of the WEEE Directive, which explicitly does not recognise interim storage as recovery. If a change in the recovery definition is the objective, this would also have to be done at the European level and not only at the national legislation level.

2.3 Recovery processes, consolidation and information concepts

Magnetic materials containing rare-earth metals

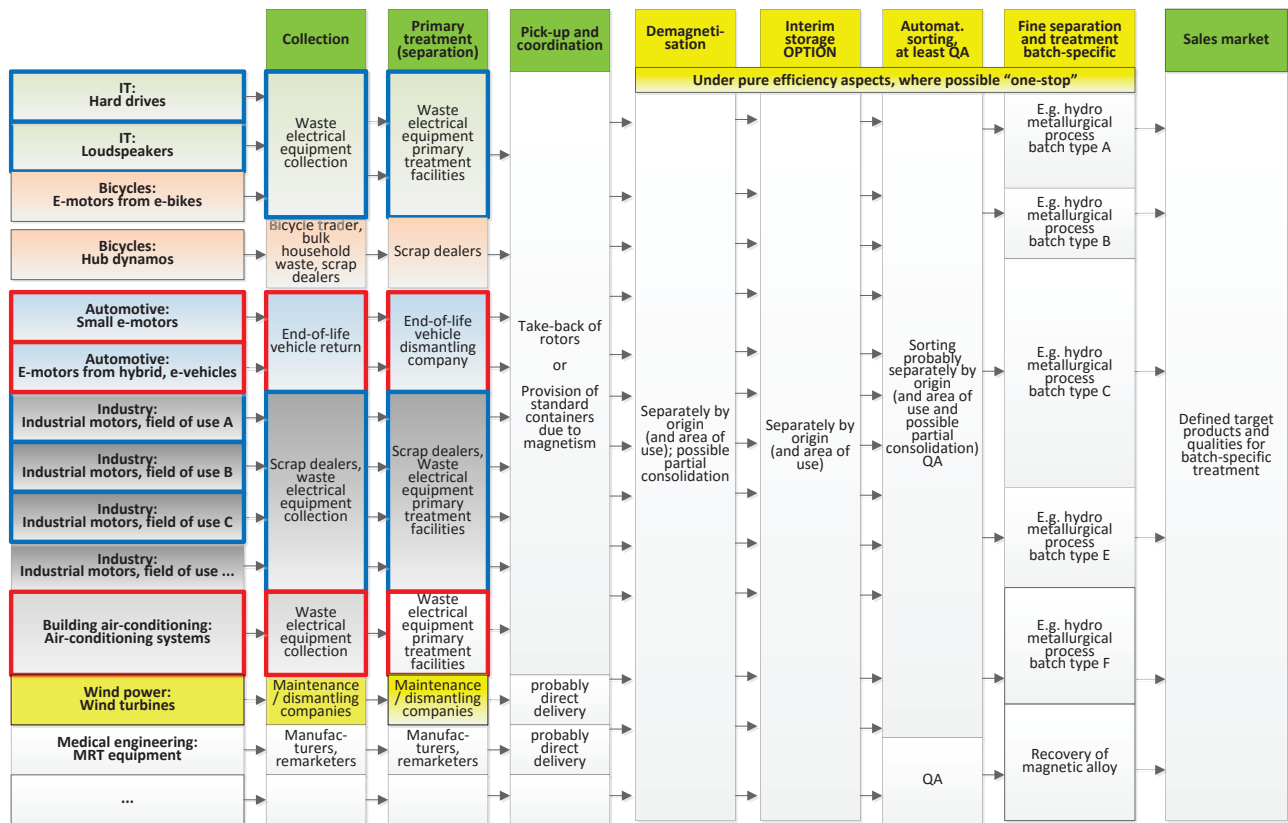
The implementation of recovery solutions is, first of all, hampered by the fact that in the waste streams with the largest quantity (currently hard disk drives) the quantity of magnets per individual device is very small, while waste streams with large individual quantities (e.g. wind turbines) currently have only a small total potential. However, a large growth in quantity is expected for electric bicycles, cars and air-conditioning systems. The potential actually available in Germany results from the quantities of magnetic material used in the applications, less the fractions that are exported or are disposed of improperly. In addition, material losses in the process chain must also be taken into consideration.

Overall, the largest cost factor is the dismantling of the magnets. For comparatively large magnets, however, economically viable dismantling, especially in larger companies, does not seem unrealistic in the long term. However, economically viable implementation of the whole process chain through to the production of marketable material fractions requires throughputs, which can probably only be achieved with growing waste streams with large potential quantities and volume consolidation.

In addition to the regulatory measures outlined, handouts for dismantling companies on the transfer of lean management approaches to the disassembly processes can assist in the reduction of dismantling time and effort.

Figure 1 shows a potential rough process chain concept for the consolidation and processing of NdFeB magnets from different sources.

Figure 1: Rough process chain concept for the consolidation and treatment of NdFeB magnets from different sources; blue frames: currently dominant waste streams in quantity terms; red frames: rapidly growing volume streams



The necessary demagnetisation should be carried out by a central treatment company in large, efficient continuous furnaces. It must be ensured that no other types of magnets get into the process. In addition, the composition of NdFeB magnets varies substantially, so that sorting/grading or separate collection would appear almost indispensable for high-quality further processing.

A basic differentiation must be made between two types of consolidation: Consolidation in the picking up and consolidation in the treatment / preparation and processing. In the case of the pickup, joint transport of (labelled) quantities from different application areas but uniform points of waste generation generally reduces transport costs.

At which points in the process chain consolidation, i.e. mixing, should take place for treatment and processing of partial quantities, depends, among other things, on the size and uniformity of the partial quantities, the foreign substances they contain, the planned treatment method and the requirements for the quality of the secondary magnet material, as well as the requirements of the customer markets for the secondary materials and the level of the expected remuneration. Large magnets from large motors or wind turbines would therefore have to pass through adjusted process chains. Waste magnetic material that is generated in larger quantities and in a well-defined form and composition, could possibly be further processed directly, for example to produce secondary magnetic alloys. Instead of manual dismantling, mechanical or automatic separation methods should be used, especially for small magnets in large quantities (e.g. from hard drives).

Treatment through to separation of pure rare-earth metals or metal oxides requires very costly separation processes and realistically can only be achieved in an existing plant, possibly abroad. If they did not already operate such processes, central treatment companies for NdFeB magnets would limit themselves to the production of secondary magnetic alloys and/or rare-earth metal oxide concentrates, which are then passed on to treatment specialists for rare-earth metals.

Interested players could occupy a largely unoccupied, foreseeable growth market, especially as soon as waste products with large magnets are disposed of in larger quantities. However, the risk of recovering the investment costs remains. It is questionable what remuneration would have to be paid to the primary treatment facility, in order to secure the required delivery readiness and delivery quality. Willingness to purchase and the conditions of the recycler of rare-earth metal concentrates, or rather price fluctuations on the raw materials market are factors that are almost impossible to predict. Changes to magnet recipes or product designs can also jeopardise the business. Despite all difficulties, implementation seems feasible.

Regulatory measures can have a supporting effect. In particular, the following are feasible:

- An obligation to label motors with NdFeB magnets, which contain individual magnets from a defined minimum mass.
- An obligation to separate magnets which are known or identifiable as such as well as from labelled motors and equipment and to recycle them.
- The obligation to install NdFeB magnets so that they can be easily dismantled, provided there is no conflict with energy and material efficiency targets.

End-of life vehicle components containing precious metals

The quantity of printed boards per end-of-life vehicle spread throughout the electronic components can be estimated to be approx. one kilogram. However, not all printed boards and electronic components by far can be removed with justifiable effort. Another obstacle is that only a small quantity of vehicle electronics or lambda probes occurs at each end-of-life vehicle dismantling facility. Treatment processes for waste electrical and electronic equipment, which are largely already available, can be used to separate precious metal containing fractions from electronic components. Initially the components containing printed boards can be dismantled manually. Then their cases can be broken open to gain access to the printed boards they contain, for example, in impact mills with subsequent manual or automatic sorting. The precious metals from the printed board fractions of the sorting process are recovered in copper mills or other metallurgical processes.

Lambda probes are already partly removed and handed over to recycling companies due to their comparatively high value. As with the separation of vehicle electronics and the printed boards they contain, recycling processes are already available here. The challenge therefore lies in the poor economic feasibility of separation and logistics.

The economical aspect could be improved if end-of-life vehicle dismantling facilities separate out easily removable components containing precious metals, and consolidate them with used parts that are unsaleable. Established pickup relationships with, for example, waste management logistics firms and treatment companies, should be developed for the pickup. For the latter, pickup logistics with consolidation of similar waste streams containing precious metals, e.g. from workshop or garage waste disposal, would be advantageous. Handouts for the dismantling facilities on the transfer of lean management approaches to dismantling processes can help to reduce the dismantling costs. Nonetheless, a market-driven approach with substantial volume effect does not appear to be realistic for this waste stream.

If a regulatory-driven approach were to be implemented, the following provisions mainly to be anchored in European law initially, would be feasible.

- Design specifications for the vehicle industry to install larger electronics components in a way that allows easy dismantling.

- Obligation to dismantle larger vehicle electronics components and to provide them to a recycling process, in which the printed boards are separated and are passed on for precious metal recovery.

Other waste streams

Environmental catalytic converters containing precious metals: Environmental catalytic converters, which are used in small individual quantities, for example, in combined heat and power plants or in catalytic post-combustion, are mainly scrapped for steel or are placed in residual waste. A round table discussion with catalyst manufacturers and representatives of catalyst users could help to develop possibilities of providing improved information for users and for developing the take-back possibilities. As environmental catalytic converters are separated out anyway after replacement and are therefore basically easily accessible and recyclable, it should also be considered whether the introduction of a legal obligation for separate collection would be useful.

Waste streams containing cerium and lanthanum: Economic solutions, which would involve the development of time-consuming treatment processes requiring high investment costs, are not in sight due to the low value of these metals. Due to the high cerium content, the use of polishing sludge in ceramic glazing or in foundries could be possible. These are also hindered by economic considerations, however, the threshold is significantly lower here.

Phosphors containing rare-earth metals: The separation of phosphors from fluorescent lamps, CRT devices and LCD devices is standard practice. Processes are available for further treatment of rare-earth metal concentrates, but are currently not operated for cost reasons. If the processes were to be started up again, they could be supplied with the separated quantities available from existing processes. Consolidation concepts extending beyond this are not considered useful due to the small and decreasing quantity.

LCD layers containing indium: LCD displays are already removed and treated and the indium-rich glass fractions they contain are already separated out. However, there is a lack of opportunity to recover indium from the glass fraction. To this end, processes developed on a laboratory scale exist, but their implementation is not yet foreseeable. A legal regulation could be useful, which obligates the primary treatment facilities to collect the glass fraction containing indium obtained from the treatment of LCD displays separately and to add them to an indium recovery process. However, this requires the appropriate methods to be made available. To strengthen the willingness to invest, it would be helpful for suitable separation methods to be developed further on a pilot scale.

Tantalum capacitors: For recycling, tantalum-rich printed boards must be sorted out by the primary treatment facility and enter operations for the disassembly and separation of tantalum capacitors. Processes are available for recovery of the tantalum from the capacitors. The operating companies of these processes already pay a remuneration for clean tantalum capacitors, depending on the current tantalum price. The printed boards should be sorted by companies which operate the plants for separating out the tantalum capacitors and which have access to relatively easily accessible, large quantities of tantalum-rich printed boards.

3. Interim storage until recycling technology is available

No adequate large-scale, industrial recycling capacities are currently available in Germany for the recovery of special metals such as neodymium or indium from post-consumer waste. In addition to the development of suitable recycling technologies, an important requirement for investments in an industrial recycling plant is the generation of relevant quantities of waste containing special metals. A feasible approach to creating the required volume streams and for bridging the time until the plant capacity is available is the interim storage of waste streams containing special metals.

3.1 Storage design and requirements for the waste to be placed in storage

Before a conceptual storage design was developed, the requirements for the waste to be placed in storage were defined, in particular:

- Suitable degree of separation or treatment before being placed in storage (e.g. polishing sludge : dewatered)
- Minimum concentration of the special metal to be recovered in future (e.g. phosphors: 1% rare-earth metals)
- Materials, components, impurities or pollutants to be removed before placing in storage (e.g. phosphors: glass, mercury)
- Weighing-up between pretreatment and concentration expense and storage expense (e.g. NdFeB magnets: with/without rotors)
- Condition for placing waste in storage (e.g. physical state, particle size, magnetisation, possible conditioning) (e.g. NdFeB magnets: demagnetised or shielded)
- Properties of the waste (composition, hazard potential, substance behaviour (e.g. leaching or emissions behaviour), maximum tolerable pollutant levels) (e.g. glass fractions containing indium: can contain toxic heavy metals)
- Description and consideration of the quality requirements for the input of the processes in development, where known (in general not known)

The minimum time required for the development of recycling processes was estimated for the various waste streams as follows:

- NdFeB magnets: in most cases more than 10 years.
- Polishing sludge containing cerium/lanthanum: 2 years.
- Separated glass fractions containing indium from the treatment of LCD: 5 years.
- Phosphors: 1-2 years.
- NdFeB magnets: Quantity and environmental relief potential in waste is currently dominated by IT products (hard drives, headphones and loudspeakers) as well as vehicle and industrial motors. By 2027, the total quantity of NdFeB magnets used in the various applications is expected to roughly triple. Regardless of their origin, magnets can be placed in storage under the same conditions, provided the waste is kept clearly and traceably separate according to sources, to enable a more targeted procedure for a future recycling company.
- Phosphors: The environmental relief potential is roughly one order of magnitude smaller than that of the other groups. Fluorescent lamps make the largest contribution. The quantities used can be assumed to reduce in future. Regardless of their origin, phosphors can be placed in storage under the same conditions, provided the waste is kept clearly and traceably separate according to sources, to enable a more targeted procedure for a future recycling company.
- Waste streams containing cerium and lanthanum: Largely unchanged future use quantities are assumed for all the waste streams examined. In view of the low material value of cerium and lanthanum as well as the foreseeable stable price situation, the development of a recycling process is not to be expected. Interim storage was only examined for polishing sludge, despite the small quantity, because due to the high target metal concentrations, the option of cost-efficient recycling exists here by using the recovered material in the ceramic industry and in foundries.
- LCD layers containing indium: Despite the rather small quantity, this waste stream has a comparably high environmental relief potential approximated by the carbon footprint main parameter. The quantities of indium used in this area are expected to double by 2035.

3.2 Basic legal conditions for interim storage

The interim storage of waste before their further disposal or recycling is subject to different waste, immission control and building regulation requirements. Apart from differentiating between the type and quantity of waste to be stored for an interim period, the duration of the interim storage also plays a decisive role.

The landfill legislation requirements for the interim storage of waste containing special metals apply and specify in detail the immission control legislation obligations, as soon as waste destined for recycling is to be stored for a period of more than three years or waste to be disposed of is to be stored for a period of more than one year. In these cases, Sec. 23 para. 1 Landfill Ordinance (“Deponieverordnung “DepV”) requires verification of subsequent proper disposal. If plants for the recycling of waste containing special metals have not yet been completely designed or built, such verification of recycling can usually not be provided by the operator of the interim storage facility. For this reason, the legislator could create new legal exceptions in the Landfill Ordinance, which exempt waste containing special metals from this duty to provide verification under the Landfill Ordinance. It is to be expected that such an amendment to the legal obligation in the Landfill Ordinance to provide verification will also affect the administrative practice for approving interim storage of waste under other regulatory instruments (immission control, waste and building legislation).

A legal obligation to stockpile certain precious and special metals would only be feasible if there was a change in the European and German raw materials strategy. In addition, the obligation to stockpile must satisfy the principle of proportionality.

A long-term interim storage facility for special metals can be operated by public bodies (e.g. financing via waste fees) or by private bodies or jointly. The legislator is able to stipulate obligations, e.g. financial obligations of manufacturers of products containing special metals, in a separate legal provision. Sec. 25 KrWG (German Circular Economy Act) can be used as the legal basis for such a legislative ordinance.

Currently, there is no waste-stream specific hand-over or recovery obligations for waste containing special metals. In particular, an obligation to store waste containing special metals in interim storages cannot be deduced from the current separation requirements or recycling targets under the ElektroG or the End-of-Life Vehicle Ordinance. To create such an obligation, specific legal separation and recovery obligations for waste containing special metals would have to be established (see in detail above at 2.2).

3.3 Assessment of the interim storage

The quantity of waste containing special metals placed in storage will grow, at least until the recovery process to be developed has been put into service. After then, the timing of calls for stored quantities will depend on many factors, for example, the terms of sales, the quality of the material, the achievable revenue and availability from other sources. The long-term interim storage facility must be designed for a maximum storage quantity, however, which it will probably only reach for a relatively short period. The maximum storage capacity will be equal to several years’ quantities. The investment costs for an autonomous storage facility with 1,000 m² storage area with additional auxiliary and traffic areas are estimated to be around one million euros. The additional operating costs incurred will probably be around € 100,000 annually. Another significant cost factor is the expenses for processing the material to be placed in storage, for example the dismantling (and demagnetisation) of the NdFeB magnets to be placed in storage.

4. Environmentally optimum recovery yield of precious and special metals

Within the scope of this project, a tool was to be developed for roughly estimating environmentally optimal recovery yield, which can be applied with reasonable expense. The recovery yield (recovery

rate) results from a sequence of yields via the process steps of the recycling chain, from the collection to the separation and treatment through to recovery. For each process step, different dependencies exist between the recovery yield and each indicator of environmental assessment, which can take the entire range from linear to highly exponential. In addition, the dependencies are also each coupled to defined processes, for example, the collection or treatment. Even if the derivation of such dependencies was theoretically possible with a great deal of data and calculation, a tool that works with such models would only feign the accuracy. In addition, due to the immense complexity, it would lack transparency and practical suitability.

Instead, a tool was therefore developed, which enables the estimation and rating of realistically achievable recovery yields. To this end, measures for increasing the recovery yield were identified and assessed qualitatively to semi-quantitatively with regard to the environmental efficacy and efficiency by means of benefit analysis in a spreadsheet tool. The underlying assessment method has seven steps:

1. Definition of the initial parameters for each partial quantity of a waste stream (e.g. target metal contents)
2. Breakdown of the status quo process into four process steps (collection, separation, treatment, recovery) as well as estimation of the current yield per process step
3. Measures for improvement
 - a) Collection of possible measures (improvement approaches) for the process steps,
 - b) Estimation of the yield improvement per process step
4. Qualitative/semi-quantitative assessment of the proposed measures with regard to 6 parameters, which are to be weighed relatively to each other: Environmental impacts due to the measure (global warming potential, toxicology), energy consumption (cumulative energy expenditure), effect on the yield of non-target materials and feasibility (realisation prospects, realisation expense)
5. Conversion of the qualitative assessment of each measure option into a numerical value as well as ranking of the proposed measures within the process steps
6. Offsetting the target metal yields of the proposed measures, which performed best within the process steps, against their primary metal values as well as the quantity of greenhouse gases, which would have been released for the primary production of the recovered target metals.
7. Overall assessment

The spreadsheet tool was applied to two examples.

Printed boards from end-of-life vehicles:

In the status quo for this waste stream containing precious metals (assumption: 1,000 t printed boards per year with an increasing trend and simultaneously decreasing precious metal content) it is assumed that the target metals considered - gold, silver, palladium and platinum – are currently completely lost during the recycling process for end-of-life vehicles. By implementing various measures/improvement approaches in the process steps with realistically estimated yield increases, a recovery yield (total yield) of 5.9 % can be achieved for the overall recycling process. This equals savings

- in greenhouse gas emissions of approx. 227,000 kg CO₂-equivalents,
- in fossil fuels and renewable energy sources equal to approx. 3.3 million MJ as well as
- in costs for purchasing the primary raw materials equal to € 566,000

Table 2: Assumed yields in the waste stream containing precious metals “Printed boards from end-of-life vehicles”

Process step	Initial situation	After implementation of selected measures / improvement approaches	
		with realistically estimated yields	with very optimistically estimated yields
Collection	50 %	52 % (advertising, opening hours, etc.)	85 %
Preseparation	0 %	40 % (expansion of manual dismantling)	60 %
Treatment	0 %	30 % (impact mill and sorting step)	85 %
Recovery	95 %	95 % (copper mill)	96 %
TOTAL	0 %	5.9 %	41.6 %

With very optimistic assumptions regarding the increase in yields for the same measures/improvement approaches, the total recovery yield is almost 42 %.

NdFeB magnets waste stream:

In the initial situation, for this waste stream containing rare-earth metals (estimation: 402 t NdFeB magnetic material/a in 2020 with increasing trend) it is assumed that the target metals considered, dysprosium, neodymium and praseodymium, are currently completely lost during the recycling process chain. By implementing various measures /improvement approaches in the process steps of the recycling process with realistically estimated yield increases, a total recovery yield of 6.8 % can be achieved, see Table 3. This equals savings

- in greenhouse gas emissions of approx. 258,000 kg CO₂-equivalents,
- in fossil fuels and renewable energy sources equal to approx. 5.85 million MJ as well as
- in costs for purchasing the primary raw materials equal to € 675,000

Table 3: Assumed yields from the waste stream containing rare-earth metals “NdFeB magnets”

Process step	Initial situation			After implementation of selected measures / improvement approaches					
				with realistically estimated yields			with very optimistically estimated yields		
	IM	IT	AF	IM	IT	EF	IM	IT	EF
Collection	30 %	50 %	50 %	30 %	65 %	52 %	60 %	70 %	85 %
Preseparation	0 %	0 %	0 %	50 %	20 %	30 %	70 %	85 %	80 %
Treatment	0 %	0 %	0 %	50 %	60 %	60 %	85 %	80 %	80 %
Recovery	0 %	0 %	0 %	85 %	85 %	85 %	90 %	90 %	90 %
TOTAL	0 %			6.8 %			42.3 %		

IM = magnets from industrial motors (60 t/a = 15 % of the total quantity considered)

IT = magnets from IT (275 t/a = 68 % of the total quantity considered)

AF = magnets from small e-motors from cars (67 t/a = 17 % of the total quantity considered)

With very optimistic assumptions regarding the increase in yields for the same measures/improvement approaches, the recovery yield is around 42 %.

5. Implementation of the measures for increasing recycling of precious and special metals

The measures developed in the project were qualitatively assessed with a view to increase the recovered quantity of target metals, the degree of obligation, realisation prospects, realisation expense and effects on the recovery of other metals.

5.1 Magnetic materials containing rare-earth metals

The following measures could be useful for increasing the recycling of magnetic materials containing rare-earth metals, which are contained in waste electrical and electronic equipment and end-of-life vehicles:

- M 1: Labelling obligation

Labelling of motors (or other applications) e.g. on the rating plate, which contain individual magnets larger than e.g. 20 g or a total quantity larger than e.g. 200 g. The labelling code indicates the magnet type (e.g. NdFeB), possibly extended with information of all rare-earth metals contained with fractions of more than 1 % by weight (e.g. NdPrDyFeB). It would need to be considered whether the labelling is also intended to enable differentiation between polymer-bonded and sinter magnets.

To be considered: The possibility of introducing mandatory labelling, e.g. via the ElektroG or the WEEE Directive or through European implementing measures based on the Ecodesign Directive or for motors through Regulation (EC) No. 640/2009 for implementation of Directive 2005/32/EC with regard to the specification of requirements for the Ecodesign of electric motors (“Motor Regulation”); and where useful extension to other products.

Note: Possible mandatory labelling for all permanent magnet types, so that increased use of other magnet types containing rare-earth metals would also be covered and evasive actions by substituting the magnet type would be prevented or are transparent.

Note: The labelling could be kept very simple for automatic sorting (e.g. NdFeB).

- M 2: Dismantling, recovery and information obligation

For motors or equipment with non-motor-dependent magnets, which are identifiable as containing NdFeB (e.g. in hard drives) or, as described under M 1, are labelled, dismantling obligation and obligation to feed the removed magnets into a recycling process, by which rare-earth metals from primary sources are substituted.

The obligations for waste electrical equipment could be anchored in the WEEE Directive (Annex VII) or in the German ElektroG (Annex 4) and for end-of-life vehicles in the EC End-of-Life Vehicle Directive (Annex I No. 4) or in the German End-of-Life Vehicle Ordinance (Altfahrzeugverordnung).

If requirements were defined there for the separation of components containing precious or special metals, the manufacturers would have to provide appropriate dismantling instructions. To be considered: Expansion of existing initiatives for establishing a central, possibly internet-based dismantling instructions database (www.i4r-platform.eu).

Note: A dismantling obligation is only productive where a labelling obligation exists or, for example, the presence of NdFeB magnets is known due to the dismantling instructions. If necessary, wording such as “... are to be dismantled from equipment that is labelled accordingly or for which the presence of magnets containing NdFeB is generally known” could be added to the named regulatory provisions.

- M 3: Obligation to design for recycling

To be considered: Weighing up all aspects, does a requirement “magnets must be dismantlable non-destructively, by simple means” seem reasonable (possible conflicts with energy and material efficiency objectives)? If yes: Examine the possibilities for obligating the manufacturers or importers of the

electric and electronic equipment or vehicles containing special metals. If such a requirement is not reasonable, the dismantling obligation would also have to be limited, e.g. “dismantling, where technically possible, economically reasonable and taking into account the social consequences”. Whether the cost is reasonable or not could be described in technical guidelines on the basis of criteria or component lists and these could be updated regularly.

- M 4: Recycling target

Introduction of a specific special metal-based recovery target with reference to the quantity entering the recovery process: in any event, to be monitored with great effort, because to achieve this, not only the separated quantities and the quantities entering the recovery process, but also the yields of the recycling processes would have to be determined and collated (cf. therefore the possibility of a corresponding adjustment of the reporting obligations in the German legislation (ElektroG and AltfahrzeugV)).

- M 5: Creation of the possibility to set up long-term interim storage facilities

For NdFeB magnets or parts which, for example, contain at least 10% NdFeB magnets; possibility of setting up and maintaining privately operated long-term interim storage facilities, to which end amendments to the requirements for long-term storage in Sec. 23 DepV.

- M 6: Consolidation/pooling workshops

Workshops involving dismantling companies, treatment companies, logistics and recycling companies providing services for dismantling companies (including in other fields), see also section 5.8 of the summary.

- M 7: Promoting the development of transport and container systems for NdFeB magnet waste

Call for proposals for a research project with the participation of partners from practical areas; Step 1: Examining the suitability of systems, which are used to provide new magnets.

- M 8: Initiation of a collection and dismantling network for electric bicycles

Establishing of a voluntary cooperation between bicycle manufacturers, distributors and recyclers, e.g. through a workshop.

Furthermore, several general measures are worth considering, see Section 5.8 of the summary.

Assessment of the measures:

Compatibility with EU law: Measures M 1, 2, 3 and 4 would extend beyond the range of obligations currently defined in the WEEE Directive or the End-of-Life Vehicles Directive. Adjustment of the European regulatory instruments is therefore required and/or tightening the German regulations. A German over-implementation is possible in principle, due to the objectives of the WEEE Directive and the End-of-Life Vehicles Directive, the high level of protection for the environment provided for in Art. 114 para. 3 and 191 of the Treaty on the Functioning of the European Union (“TFEU”) and the “reinforcement of protection” clause of Art. 193 TFEU. However, it would have to be ensured that these legislative measures do not have a negative effect on smooth functioning of the internal market or cause competitive distortions.

Additional reporting obligations within the scope of M 4 would also have to comply with implementing acts of the Commission for the specification of a uniform registration format and the frequency of reporting according to Art. 16 para. 3 WEEE Directive.

Within the scope of M 5 it would also have to be considered that the WEEE Directive explicitly does not recognise interim storage as recovery. The interim storage of components containing special metals is also not recycling as defined in the End-of-Life Vehicles Directive. It would therefore require the Euro-

pean legislator to become active, if the definitions of recovery and recycling are to also include interim storage.

At European level, the provision of the measures according to M 1 and M3 as well as the dismantling instructions according to M2 would also be feasible in implementing measures according to the Ecodesign Directive 2009/125/EC.

Conclusion: Effective measures with a high degree of obligation are M2 in combination with M1, which can be additionally strengthened through M3 and/or M4. The implementation effort for M3 and M4 in particular, however, is fairly high. Measures with overall favourable assessments, which could be implemented at low expense, are M6 and M8. Both measures also have positive effects on the recovery of other metals. However, the degree of obligation is significantly lower here.

5.2 Printed boards containing precious metals and lambda probes from end-of-life vehicles

The following measures could be useful for increasing the recovery of precious metals from vehicle electronics:

- M 1: Design specifications for the vehicle industry

Obligation regarding dismantling-compatible installation (see e.g. VDI Guidelines 2243: Recycling-orientated product development) of larger electronic components in vehicles; to be anchored in the European End-of-Life Vehicles Directive and in the German End-of-Life Vehicle Ordinance, if applicable in the form of additional or added annexes; only productive in combination with a dismantling obligation for end-of-life vehicle dismantling facilities.

Limitation to relevant components, in order to avoid unreasonable expense; the separation recommendation of Groke et al. (Groke et al. 2017) could serve as an initial basis to identify the relevant components.

To be considered: It should first be investigated, to what extent trade-offs can occur with the weight reduction and material efficiency design objectives.

- M 2: Dismantling, recovery and information obligation

Obligation to dismantle larger vehicle electronics components and to feed them into a recycling process, in which the printed boards are separated and are passed on for precious metal recovery; anchored in the End-of-Life Vehicles Directive, Annex I (Minimum technical requirements for treatment) No. 4 (Treatment operations to promote recycling) or in the Annex to the German End-of-Life Vehicle Ordinance.

If new requirements for the separation of components containing precious metals from end-of-life vehicles within the scope of the dismantling were to be specified by law, this would also mean that the manufacturers would have to provide appropriate added dismantling instructions for the dismantling companies, which explain how these components containing precious metals can be dismantled.

- M 3: Improve the return of end-of-life vehicles

Increases the potential for the recovery of precious metals, not only in case of dismantling parts containing precious metals but also – with significantly poorer yields - on shredding non-dismantled components that are still in the end-of-life vehicles.

- M 4: Shredder optimisation

Promotion of projects for the improvement of precious metal yield (as well as the yield of other metals such as steel, copper and aluminium) from shredder fractions in case of components containing precious metals that are not dismantled; e.g. by calling for proposals for a research project with the participation of industrial partners.

- M 5: Consolidation/ pooling workshops

Within the scope of consolidation workshops, opportunities will be worked up for using and expanding existing networks, see also Figure 2. It could be useful to bring together dismantling companies (and possibly other companies with similar waste from other industries) with their potential customers and logisticians to extend existing or to develop new networks. The objective is for appropriate agreements to be made in order to use already established pickup relationships and to set up new connections.

- Primary and general measures

Furthermore, several general, primary measures addressing end-of-life vehicle dismantling facilities can increase the efficiency of in-house and inter-company logistics, especially the development and introduction of a recycling enterprise resource planning system (RERP), possibly supported by a level detection system, as well as working up a “lean management” handout, see section 5.8 of the summary.

Assessment of the measures:

Compatibility with EU law: Measures M 1 and 2 would extend beyond the range of obligations defined to date in the End-of-Life Vehicles Directive. Adjustment of the European regulatory instruments would therefore be required and/or tightening the German regulations. Such a German over-implementation is possible in principle due to the objectives of the End-of-Life Vehicles Directive, the high level of protection for the environment provided for in Art. 114 Para. 3 and 191 of the Treaty on the Functioning of the European Union (“TFEU”) and the “reinforcement of protection” clause of Art. 193 TFEU. However, it would have to be ensured that these legislative measures do not have a negative effect on smooth functioning of the internal market or cause competitive distortions.

Conclusion: The only effective measure with high degree of obligation and overall favourable assessment is M2. However, the implementation expense here is fairly high. Measures M3, M4 and M5 have favourable assessments overall. These measures also have positive effects on the recovery of other metals, however, the degree of obligation here is rather small.

5.3 Environmental catalytic converters containing precious metals

The following measures could be useful for increasing the recovery of precious metals from environmental catalytic converters:

- M 1: Round-table discussion with catalyst manufacturers and users

Discussion of possibilities for better information of users (e.g. via QR code) and development of the take-back possibilities.

- M 2: Introduction of a legal obligation for separate collection

For example, within the scope of a legal regulation under the extended producer responsibility of the manufacturers and distributors of environmental catalytic converters (including obligations to keep separately and to take back), or, if the environmental catalytic converters are handled as commercial waste: Extension of the Commercial Wastes Ordinance (“Gewerbeabfallverordnung”) with obligations of the end users of environmental catalytic converters to keep them separate.

Assessment of the measures:

Compatibility with EU law: For the national implementation of the measures under M 2 in legal regulations based on the German Circular Economy Act (KrWG) or in the Commercial Wastes Ordinance (“Gewerbeabfallverordnung”), the requirements of the Waste Framework Directive would have to be respected, in particular the requirements regarding waste hierarchy in Art. 4 and on extended producer responsibility in Art. 8 ff. Within this framework, no amendments to European law would be required.

Conclusion: M2 has good effectiveness with a high degree of obligation and a positive assessment overall. M1 has less effectiveness and commitment, but due to the low implementation expense it also has a positive assessment overall. There are no reliable figures on the precious metal content of this waste stream.

5.4 Waste streams containing cerium and lanthanum

Most waste streams considered are not suitable for the recovery of cerium and lanthanum because their concentrations and individual quantities are too small. Where quantities already exist in consolidated form (NiMH batteries, slags from the treatment of catalytic converters removed from cars), the ecological and economic value of the metals contained is too low to justify more complex activities for their recovery.

In addition, cerium and lanthanum are produced as low-value byproducts in the extraction of rare-earth metals from ore. The extent of mining activities is determined by the demand for metals of higher value that occur in less concentrated form in the ores. This leads to the availability of cerium and lanthanum at far lower and more stable prices than the other rare-earth metals. Supply bottlenecks are hardly to be expected here. The ecological backpack of cerium and lanthanum is also comparatively small. Recycling of these metals is therefore not advantageous, as long as this requires sophisticated recovery methods.

Cerium appears in polishing sludge in fairly high concentrations. The direct use of polishing sludge in ceramic glazes or foundries could be possible at comparatively low expense, provided suitable quality assurance measures are taken, and would substitute cerium and lanthanum from primary ores.

The following measure could be useful to increase the recycling of waste streams containing cerium and lanthanum from polishing sludge:

- M 1: Initiation of a workshop

Bringing together possible stakeholders of the process chains for the use of polishing sludges in ceramic glazes or foundries.

Conclusion: The only measure option has a positive overall assessment at low implementation expense.

5.5 Phosphors containing rare-earth metals

Methods are available for the treatment of phosphors to produce rare-earth metal concentrates, but are currently not operated for cost reasons. If the processes were to be started up again, the already separated quantities from existing treatment processes for lamps and equipment could be fed to these plants. Measures extending beyond this are not useful, due to the low and also declining quantity. No options are named for measures concerning these waste streams.

5.6 Separated LCD layers containing indium

The following measures could be effective in improving the recovery of indium from separated LCD layers:

- M 1: Research project on the treatment of glass fractions containing indium

Initiation of a funded project on the implementation of the treatment of glass fractions containing indium produced by the treatment of LCD displays on a pilot scale, with material flow and cost-effectiveness balances worked up for the production scale.

- M 2: Creation of the possibility to set up long-term interim storage facilities

For separated LCD layers containing indium; possibility to set up and operate privately operated long-term interim storage facilities, which can be facilitated by amendments to the requirements for long-term storage in Sec. 23 DepV.

- M 3: Obligation to separately collect and recycle glass fractions containing indium

Obligation of the primary treatment facility to collect the glass fraction from the treatment of LCD displays separately and to feed them into a process for indium recovery; this could be anchored in the WEEE Directive (Annex VII) or in the German Electrical and Electronic Equipment Act (ElektroG) (Annex 4).

Assessment of the measures:

Compatibility with EU law: Measure M 3 would extend beyond the range of obligations defined to date in the WEEE Directive. Therefore, an adjustment of the WEEE Directive would be required and/or an amendment of the ElektroG. Such an over-implementation in the German ElektroG is possible in principle, due to the objectives of the WEEE Directive, the high level of protection for the environment provided for in Art. 114 Para. 3 and 191 of the Treaty on the Functioning of the European Union (“TFEU”) and the “reinforcement of protection” clause of Art. 193 TFEU. However, it would have to be ensured that these legislative measures do not have a negative effect on smooth functioning of the internal market or cause competitive distortions.

Within the scope of M 2 it would also have to be considered that the WEEE Directive explicitly does not recognise interim storage as recovery. It would therefore require the European legislator to become active, if the definition of recovery is to also include interim storage. Furthermore, by changing the requirements for the long-term storage of waste in Sec. 23 DepV (German Landfill Ordinance), the German legislator could simplify the operation of such an interim storage facility.

Conclusion: The only measure with high effectiveness and commitment is M 3. This measure has a positive assessment overall. M1 also has a favourable assessment overall. However, the degree of obligation is rather low here.

5.7 Separated tantalum capacitors

In principle, consolidation would be possible by involving all primary treatment facilities. However, to do this, they would have to relinquish high-quality printed boards, which they already sell profitably. Tantalum’s share of the overall value is very small, it therefore offers hardly any motivation for such action. In addition, separating out printed boards with relevant tantalum content would require significant sorting expense, which could not be reasonably reimbursed by potential purchasers of the printed boards. The printed boards should therefore be sorted out by companies which if appropriate operate their own plant for separating out the tantalum capacitors. Such plants can offer prospects of large quantities of tantalum-rich printed boards that are relatively easy to access and, once they are in operation, they can attract further quantities from interesting market segments with an eye toward the target metals. No measures are named for this waste stream.

5.8 Primary general measures for logistics and consolidation/pooling

In addition to the specific options described above for individual waste streams, further action options exist on a general level to increase the efficiency of in-house and inter-company logistics, which target overall waste stream and material flow management in the companies, and not only the specific waste streams containing precious and special metals. Nevertheless, they can have positive effects on the recovery of the target metals from waste. These measures are located in the process steps dismantling and recovery:

- promoting the development of a recycling enterprise resource planning system (RERP), in-house and/or inter-company,

- working up a “lean management” handout,
- the development and distribution of level detection systems, for example, to support an RERP, as well as
- cross-material flow consolidation, see Figure 2, which aims to improve capacity utilisation of the transport movements in logistics chains. If a terminal is interposed, the consolidation is largely independent of the contents of the transported objects. The consolidation potential results from the spatial proximity of the pickup addresses or the target destinations downstream of the terminal. This can be supported, for example, by consolidation workshops.

Figure 2: Consolidation potential of selected material flows.

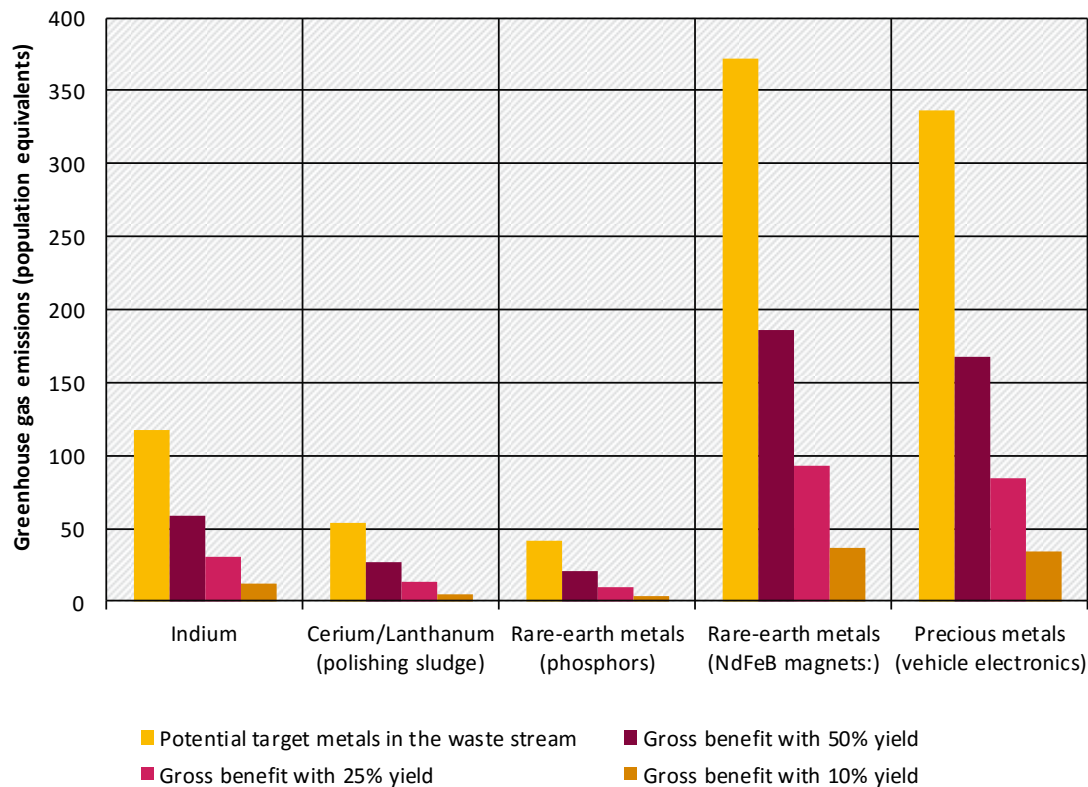


In addition, there are options for measures that take effect at a higher level and that can develop effects that are self-regulating and largely independent of dynamic technical and economic changes. Examples of this include: Increasing return quantities by reinforcing enforcement, preferential tax benefits for recycling processes, tax advantages for the use of recyclate or material tax or CO₂ tax on materials from primary raw materials in relation to their carbon footprint. The analysis and assessment of these measures is not the subject of this study.

5.9 Reasonableness of measures

The cost of realising and implementing measures to increase recycling should be proportionate to the expected ecological benefits. Therefore, the environmental relief potential achieved by recycling the target metals in the waste stream considered, which results from avoiding the primary production, has been estimated using the indicative parameter of greenhouse gas emissions (Figure 3).

Figure 3: Gross environmental relief potential of the target metals in the waste streams considered by substituting primary production; represented on the basis of the indicative parameter of greenhouse gas emissions (figures in population equivalents); population equivalents of carbon footprint in Germany: 11.4 t CO₂eq/a (Source: Umweltbundesamt 2018); Carbon footprint of target metals: Dy, Tb: PLoS (2014); all others: ecoinvent (2017).



The possible ecological benefit of measures for improving recycling is limited to the share of metals effectively recovered from this potential. Due to incomplete collection and losses along the process chain, the actual yield to be expected can be significantly lower. The greenhouse gas emissions caused by the recycling processes must then be deducted from this gross benefit.

Even in the case of NdFeB magnets and if quantities increase significantly in the future, the potential will probably increase to a few thousand population equivalents. The effectively expected benefit with regard to greenhouse gas emissions, however, will hardly exceed a few hundred population equivalents in Germany even in the next years due to exports in the form of used equipment, losses along the recovery chain and greenhouse gas emissions from the recovery. At least from the view of climate protection, the implementation of elaborate legislative measures therefore seems hardly appropriate.

In addition to climate protection, other aspects are relevant regarding the question of the appropriateness or proportionality of (legal) measures to increase the recovery of precious and special metals, for example:

- Other environmental impacts from the primary extraction of the metals, these include, among other things, radioactive radiation emissions during the extraction of rare-earth metals or mercury emissions from small-scale (artisanal) mining of gold.

- The security of supply, particularly with critical raw materials. The list of critical raw materials for the EU 2017 (European Commission 2017) includes, among other things, the precious and special metals indium, tantalum, platinum group metals as well as light rare earth elements and heavy rare earth elements considered in the project. In the Circular Economy package (European Commission 2015, page 16), the EU Commission encourages the member states to promote the recycling of critical raw materials. The increasing attention of the European waste management on the critical raw materials is also made clear in that since May 2018 they have been explicitly addressed in the Waste Framework Directive, among other things, in order to reduce the dependency of the Union on resource imports (European Union 2018).
- The securing of raw materials, especially for future climate protection technologies that will become increasingly relevant in the future, such as photovoltaic systems, wind turbines and electromobility.
- In the medium or long-term, increased quantities of many of the precious and special metals considered can be expected in the waste streams.

However, the assessment of these aspects must also take into consideration the expected substantial losses along the recovery chain of most of the waste streams considered.

Nevertheless, further activities for improving or realising the recovery of the target metals from the waste streams considered are purposeful and desirable. Thus, in certain constellations, for example, direct access of an equipment manufacturer or recovery company to suitable waste quantities, the separation of target metals can be ecologically and possibly even economically advantageous - insofar as purchasers for the produced material are available in precisely these constellations. Distinct price peaks in case of high demand can also be good preconditions for the development of limited recovery activities, because purchasers temporarily appear on international markets. And finally, individual players succeed every now and then in developing creative solutions for partial quantities of waste streams. In addition, in several of the named fields it is possible that individual players will set up comprehensive solutions on their own initiative, if this is in order to support other economically more promising activities.

Targeted and limited activities by the state can be helpful, if they support the own initiative of the stakeholders. For example, players can be brought together at consolidation workshops or round table discussions. For the participants, this can be interesting, especially if they aim to achieve basic improvements, with which the possible recovery of the metals considered here is only one of many feasible positive effects. This is the case, for example, in the development of recycling enterprise resource planning systems or the development of lean management handouts especially for small and medium enterprises.

Legislative measures, which take effect on a higher level can improve the preconditions for the player's own initiatives. For example, measures to improve compliant collection of end-of-life products such as end-of-life vehicles or waste electrical equipment lead to larger quantities of precious or special metals accessible to interested players, but in particular to larger quantities of bulk metals. The creation of a possibility for long-term interim storage of suitable separated components or materials by recycling companies also contributes to the expansion of their room for manoeuvre. This can help with the development of solutions, and not only for the metals considered here.

1 Einleitung

Für die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Abfällen sind geeignete und bewährte Verfahren seit vielen Jahren im großtechnischen Einsatz. Dennoch sind Edelmetalle, insbesondere Gold und Platingruppenmetalle für dieses Vorhaben aus zwei Gründen wichtig. Einerseits ist die Gewinnung dieser Metalle mit so großen Umweltbelastungen verbunden, dass sie auf die Ökobilanz von Produkten trotz ihrer meist sehr geringen Konzentrationen wesentlichen Einfluss haben können. Dies ist einer der wesentlichen Gründe, warum z.B. die separate Verwertung von Elektronikkomponenten aus Alt-Kfz angestrebt wird ist, denn bei den derzeitigen Prozessen der Altfahrzeugverwertung werden diese Metalle nur in sehr geringem Umfang zurückgewonnen.

Sondermetalle wie Seltenerdmetalle (u.a. Neodym), Indium oder Tantal werden heute bis auf marginale Ausnahmen aus Post-Consumer-Abfällen fast überhaupt nicht zurückgewonnen und aus Produktionsabfällen nur in eingeschränktem Maße. Dies liegt zum Teil daran, dass viele der Produkte, die solche Metalle enthalten, noch nicht lange auf dem Markt sind, so dass sowohl der Aufbau von großtechnischen Recyclingverfahren noch nicht erfolgt ist als auch die Rücklaufmengen noch zu gering sind. Dies ist etwa bei NdFeB-Magneten der Fall, die aus einem Teil der Produkte durchaus mit überschaubarem Aufwand ausgebaut werden könnten.

Der Aufbau entsprechender Separations- und Recyclingverfahren scheitert unter anderem an den zu geringen Mengen, die einzelne Akteure in die Hand bekommen können. Eine gezielte Bündelung und Zusammenführung entsprechender Abfälle aus unterschiedlichen Quellen und Einsatzbereichen könnte möglicherweise helfen, dieses Problem zu lösen. Ein weiterer denkbarer Ansatz wäre die Zwischenlagerung entsprechender sondermetallhaltiger Komponenten oder Abfallströme, deren Aufkommen durch Marktwachstum absehbar steigen wird. Auf diese Weise ist es möglicherweise erreichbar, dass einerseits jetzt anfallende Mengen für eine künftige Verwertung gesichert werden und andererseits ein Mengenpool aufgebaut werden kann, der eine frühzeitigere Inbetriebnahme der erforderlichen Verwertungsanlagen ermöglicht.

Eine wichtige Rolle spielen aber auch Informationsdefizite, insbesondere bei Erstbehandlern, Wartungsunternehmen oder Abbauunternehmen, die Alttechnik zurückbauen. Nur wenn diese Akteure über die für eine gezielte Separation erforderlichen Informationen verfügen, können sie die damit verbundenen wirtschaftlichen Chancen nutzen. So könnte z.B. ein Altfahrzeug-Demontagebetrieb durchaus Interesse haben, aus gewissen Fahrzeugmodellen gezielt für ihn wirtschaftlich interessante Elektronikkomponenten auszubauen. Er müsste dazu allerdings wissen, in welchen Fahrzeugmodellen leicht ausbaubare, hochwertige Elektronikkomponenten enthalten sind und wo sich diese befinden.

Ein weiterer wichtiger Faktor darf dabei aber nicht außer Acht gelassen werden: Die Konzentration insbesondere von Sondermetallen in den Produkten oder auch Bauteilen ist häufig so gering, dass auch unter optimistischsten Annahmen eine wirtschaftliche Rückgewinnung nicht möglich ist, und zudem kann die verbaute Gesamtmenge zu gering sein, um den Aufbau eigener Rückgewinnungsprozesse zu rechtfertigen.

Aus all diesen Gründen wurden und werden in den letzten Jahren zahlreiche Forschungsprojekte durchgeführt, die dazu beitragen sollten, die Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen aus Abfällen zu verbessern oder überhaupt erst zu ermöglichen (z.B. Luidold 2013, Bast et al. 2014, Buchert et al. 2014, Zepf 2015, Elwert et al. 2018).

Einige dieser Vorhaben führten zu eher ernüchternden Ergebnissen (z.B. Zepf 2015, Buchert et al. 2014, Binnemans et al. 2013), andere zeigen durchaus interessante Potenziale und technische Lösungsmöglichkeiten auf (z.B. Buchert et al. 2012, Zimmermann et al. 2014, Luidold et al. 2013). In den meisten Fällen ist die Wirtschaftlichkeit jedoch kritisch, was nicht zuletzt an den unzureichend vor-

handenen und/oder unzureichend gebündelten Mengen entsprechender Abfälle liegt, aber auch am Aufwand, der erforderlich ist, um etwa metallhaltige Bauteile zu separieren.

Es zeigt sich somit, dass neben der Entwicklung und Realisierung geeigneter Verwertungsverfahren gerade auch Ansätze zur Generierung relevanter Mengen an edel- und sondermetallhaltigen Abfällen eine wichtige Voraussetzung für die Implementierung von Recyclinglösungen im industriellen Maßstab sind. Erst wenn hinreichend große Mengen solcher Abfälle in geeigneter Form für Verwertungsprozesse verfügbar sind, können auch die benötigten Anlagen errichtet werden.

Zur Schaffung der erforderlichen Mengenströme werden vor allem zwei Ansätze diskutiert. Das Pooling bzw. die Bündelung edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme bei der Erfassung und die Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Abfallströme, bis die erforderliche Recyclingtechnik verfügbar ist. Beide Ansätze waren Gegenstand dieses Vorhabens.

Bei allen Überlegungen zur Implementierung weiterer Recyclinglösungen muss allerdings auch beachtet werden, dass Recycling nicht in jedem Falle ökologisch vorteilhaft sein muss. Zum einen wächst der Aufwand zur weiteren Steigerung von Rückgewinnungsgraden mit dem erreichten Rückgewinnungsgrad. Andererseits kann es im Extremfall aber auch sein, dass die Konzentration eines Metalls in einem Abfallstrom so gering ist, dass seine Rückgewinnung auf ökologisch vorteilhafte Weise kaum mehr möglich ist.

Aus diesem Grunde war ein weiterer Gegenstand dieses Vorhabens die Entwicklung und exemplarische Anwendung einer Methode zur Abschätzung des optimalen Rückgewinnungsgrades eines Metalls aus einem Abfallstrom.

Ziel des Vorhabens war es, Konzepte zur Lenkung geeigneter Abfallströme zu entwickeln, die es ermöglichen, die Rückgewinnung ausgewählter, aus umweltpolitischer Sicht relevanter Edel- und Sondermetalle zu stärken. Hierzu sollten Vorschläge unterbreitet werden, um die gesamte Verwertungskette, von der Erfassung über die Behandlung bis zur Metallrückgewinnung, für komplexe, edel- und sondermetallhaltige Abfallströme zu optimieren.

Zu diesem Zweck wurden drei Themenfelder bearbeitet:

Erfassung, Bündelung, „intelligente Logistik“: Für ausgewählte Abfallströme mit oft gering konzentrierten Edel- und Sondermetallen sollten qualitativ neuartige Logistikkonzepte und Möglichkeiten zur intelligenten Organisation und Gestaltung von Material- und Informationsflüssen entwickelt werden, die das Recycling der Edel- und Sondermetalle technisch und wirtschaftlich möglich machen.

Zwischenlagerung: Für bestimmte edel- und sondermetallhaltigen Abfälle, für die großtechnische Behandlungs- bzw. Rückgewinnungsverfahren noch nicht großtechnisch verfügbar, aber bereits in der Entwicklung sind, war der Ansatz der Zwischenlagerung zu konkretisieren und zu prüfen.

Ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad: Kriterien für die Abschätzung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades aus den Abfallströmen sollten entwickelt und beispielhaft auf ausgewählte edel- und sondermetallhaltige Abfallströme angewendet werden.

Die Bearbeitung wurde durch Fachworkshops unterstützt. Die identifizierten Handlungsoptionen und die Zweckmäßigkeit ihrer Implementierung wurden abschließend bewertet.

2 Bündelung von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen

2.1 Identifizierung der Abfallströme zur Bündelung und Zwischenlagerung

Zunächst wurden edel- und sondermetallhaltige Abfallströme identifiziert, für die mit Blick auf die Rückgewinnung der zu betrachtenden Edel- und Sondermetalle bisher keine etablierten Erfassungs- und/oder Rückgewinnungssysteme bestehen, die aber für eine Bündelung und / oder Zwischenlagerung interessant erscheinen.

Zur Identifikation solcher Abfallströme wurden sowohl öffentlich zugängliche Ergebnisse laufender oder abgeschlossener Forschungsprojekte als auch Ergebnisse eigener Arbeiten und weitere Recherchen gesichtet und bewertet. Abfallströme, für die bereits etablierte Erfassungssysteme bestehen (z. B. komplette Altfahrzeuge oder Leiterplatten aus Elektroaltgeräten als solche), sind nicht Gegenstand dieser Analyse.

2.1.1 Vorgehen bei der Bewertung

Im ersten Schritt wurden Abfallströme, die für eine Untersuchung im Rahmen des Projektes in Frage kommen könnten, mit zuvor definierten Kriterien bewertet. Auf diese Weise wurde entschieden, welche Abfallströme im Projekt nicht weiterverfolgt werden. Zu den verbleibenden Abfallströmen wurde anschließend geprüft, ob im Einzelfall schon jetzt abzusehen ist, dass eine Rückgewinnung der Zielmetalle über Bündelung und/oder Zwischenlagerung mit großer Wahrscheinlichkeit nicht zweckmäßig wäre.




Die verbleibenden Abfallströme wurden abschließend den drei Untersuchungsbereichen Bündelung und Informationsbereitstellung (Kapitel 2) sowie Zwischenlagerung (Kapitel 3) zugeordnet.

Produktionsabfälle und Ausschuss sowie Reststoffe aus der Wartung sind nicht Gegenstand dieser Analyse.

Die Bewertung der identifizierten Abfallströme wurde anhand der sechs folgenden Kriterien durchgeführt:

2.1.1.1 Kriterium A: Wert Konzentration

Tabelle 4: Kriterium A: Wert Konzentration

A) Wert-Konzentration des Zielelementes in der Bündelungsebene	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
Gering	
Mittel	
Hoch	

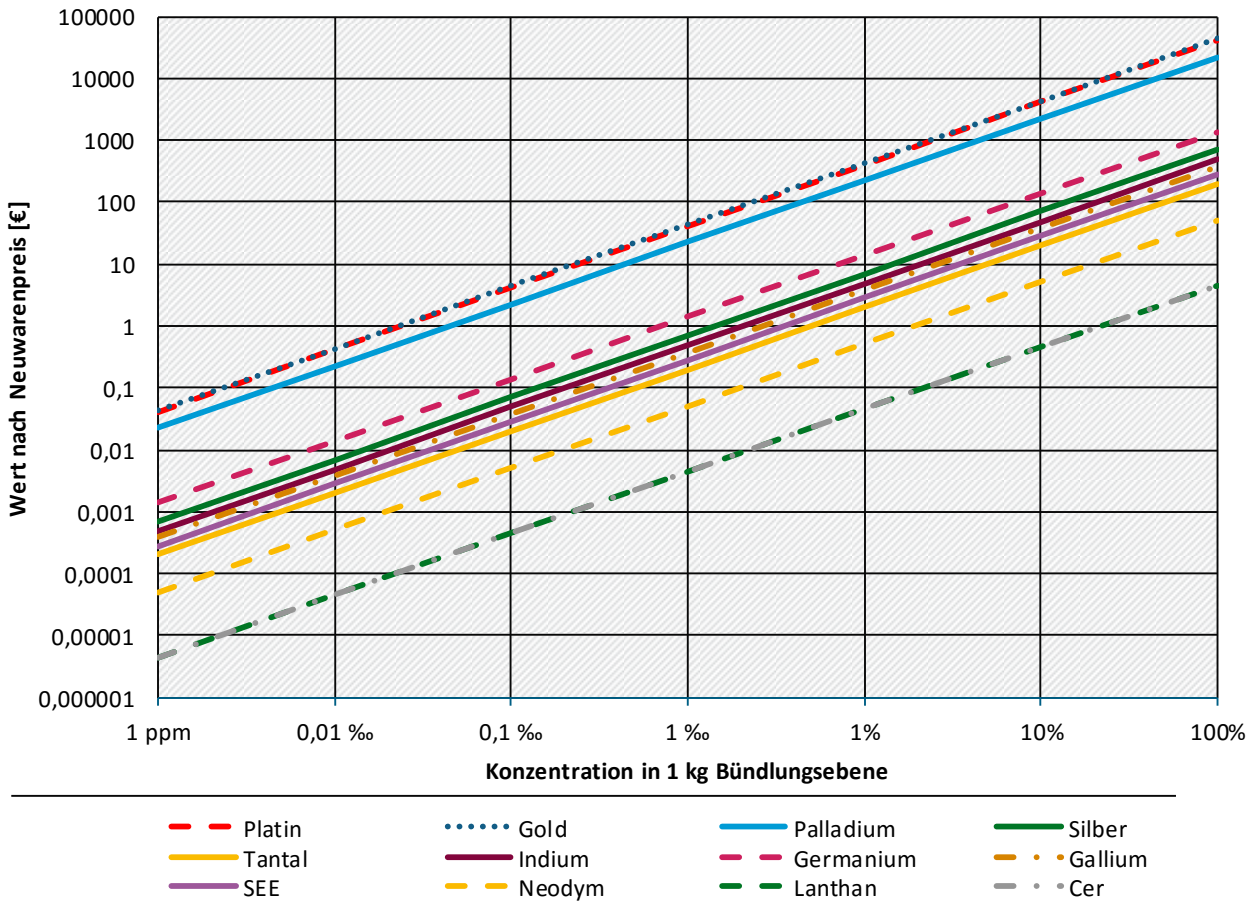
- Zielelemente: die für eine Bündelung und/oder Zwischenlagerung zu prüfenden Elemente
- Bündelungsebene: die Form (z.B. Demontagetiefe), in der die Abfälle voraussichtlich zu bündeln wären.
- Die Konzentration der Edel- und Sondermetalle im Abfallstrom wird unter Berücksichtigung des jeweiligen Wertpotenzials bewertet. Die Bündelungsebene (z.B. im Produkt, im separierten Bauteil, im freigelegten Bauelement) ist dabei mitentscheidend, kann jedoch z.T. nur eingeschränkt beurteilt werden.

Eine Einschätzung der Wert-Konzentration des betreffenden Metalls ist mit Hilfe des folgenden Diagramms (Abbildung 4) möglich.

Abbildung 4: Wert nach Neuwarenpreis für verschiedene Konzentrationen der Zielelemente

Kriterium A: Wert Konzentration

Wert-Konzentration des Zielelementes in der Bündelungsebene



Quelle: Neuwarenpreise nach USGS 2017




In Abbildung 4 sind die Marktwerte der Zielelemente – berechnet aus Mittelwerten der Neuwarenpreise der Jahre 2012 bis 2016 (U.S. Geological Survey 2017; S. 70, S.72, S. 80, S. 126, S. 152, S.166, S.134) im Verhältnis zur Konzentration in der Bündelungsebene aufgetragen.

Das Diagramm verdeutlicht die Unterschiede. So liegt der Marktwert der enthaltenen Metallmenge bei einer Konzentration von 0,1 Promille Gold oder Platin in einem kg gebündeltem Stoffstrom bei mehreren Euro. Hingegen entsprechen selbst 10 % Lanthan oder Cer, also ein um drei Größenordnungen höherer Anteil in einem kg gebündeltem Stoffstroms einem Neuwarewert von deutlich unter einem Euro.

Der tatsächliche Erlös durch die Rückgewinnung wird jedoch deutlich unter diesen Werten liegen (Aufbereitungskosten und Materialverluste über die Verwertungskette).

2.1.1.2 Kriterium B: Mengenpotenzial Deutschland




Tabelle 5: Kriterium B: Mengenpotenzial

A) Mengenpotenzial des Zielelementes in der Bündelungsebene	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
Gering	
Mittel	
Hoch	

- Der Mengenstrom des jeweiligen Abfallstromes bzw. der Bündelungsebene wird quantifiziert.
- Teilweise erfolgt auf Grund unzureichender Datenlage eine Abschätzung der Größenordnung.
- Künftig zu erwartende Mengenentwicklungen werden ebenfalls mit berücksichtigt.

2.1.1.3 Kriterium C: Separationsaufwand im Verhältnis zum Wertpotenzial

Tabelle 6: Kriterium C: Separationsaufwand im Verhältnis zum Wertpotenzial




B) Separationsaufwand im Verhältnis zum Wertpotenzial (Aufwand pro Neuwertwert des Zielelementes in der Bündelungsebene)	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
Hoher Aufwand bei geringem Wert	
Geringer Aufwand bei geringem Wert bzw. hoher Aufwand bei hohem Wert	
Geringer Aufwand bei hohem Wert	

- Separationsaufwand: Abgeschätzter Aufwand für die Demontage / Freilegung der voraussichtlichen Bündelungsebene aus der Gesamteinheit (z.B. dem PV-Modul).
- Je nach gewählter Bündelungsebene ist eine mehr oder weniger aufwendige Demontage / Separation notwendig.

Der Aufwand für Demontage / Separation kann z.T. nur eingeschränkt beurteilt werden.

2.1.1.4 Kriterium D: Verwertungsprozess




Tabelle 7: Kriterium D: Verwertungsprozess

C) Vorhandensein eines etablierten Verwertungsprozesses für die Bündelungsebene	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
Bisher keine Verwertungsansätze	
In der Entwicklung bzw. außer Betrieb	
In Betrieb	

- Bewertung der derzeitigen Verwertungsoptionen

2.1.1.5 Kriterium E: Informationslage

Tabelle 8: Kriterium E: Informationslage

A) Informationslage in Bezug auf das Anwendungsgebiet (Aufkommen, Zusammensetzung, bisherige Forschungsergebnisse, etc.)	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
Sehr wenige Informationen verfügbar	
Grundlegende Informationen verfügbar	
Umfangreiche Informationen verfügbar	

- Umfang der vorliegenden Informationen insbesondere zu Konzentrationen in den Anwendungsgebieten und Mengenaufkommen, z.B. aus Ergebnissen laufender oder abgeschlossener Forschungsprojekte

2.1.1.6 Kriterium F: Erfassungs- und Bündelungssystem

Tabelle 9: Kriterium F: Erfassungs- und Bündelungssystem

B) Vorhandensein eines etablierten Erfassungs- / Bündelungssystems	Bewertung bzgl. Eignung für die weitere Betrachtung
	Für die Bündelungsebene vorhanden
	Relevante Ebene auf der eine Erfassung / Bündelung bereits heute stattfindet
	nicht vorhanden

- Bewertung der derzeitigen Erfassungs- und Bündelungswege hinsichtlich ihrer Nähe zur angenommenen Bündelungsebene
- ➔ Indikator für die Eignung der Abfallströme zur Analyse von Bündelungs- / Zwischenlagerungsoptionen im Rahmen dieses Vorhabens.

2.1.1.7 Bewertung der Abfallströme

Die Bewertung der Abfälle für die weitere Bearbeitung erfolgt nach folgenden Kriterien

- Kriterien **A** und **B** rot => sehr geringes Mengenpotenzial
➔ KO-Kriterium
- Wenn bei Kriterien **C**, **D** oder **E** zwei von drei Kriterien „rot“ sind
➔ keine Betrachtung im Rahmen der weiteren Analyse, da derzeit zu geringe bzw. nicht fundiert einschätzbare Erfolgsaussichten

Kriterium **F** ist wichtig für die Art der Berücksichtigung

- Für die Bündelungsebene vorhanden ➔ Prüfung der Zubündelung anderer Systeme = Nutzung als Backbone/ Huckepack-System für bisher unerschlossene Ströme
- Ebene auf der die Erfassung / Bündelung bereits heute stattfindet ➔ Einzelfallbewertung
- Nicht vorhanden ➔ Prüfung der Bündelungsmöglichkeit; wenn zusätzlich Kriterien A, B und C überwiegend grün, dann Prüfung auf Eignung als Backbone-Abfall für den Prozessaufbau

Tabelle 10: Beispiel für die Bewertung der Abfallströme

Zielelement: Beispiel	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert- Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ ... €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte Anwendung / Teilsystem						nicht vor- handen	Nein

Beide rot:
KO-Kriterium
 Bei 2 von 3 rot:
keine weitere
Betrachtung

2.1.2 Bewertung Edelmetalle

2.1.2.1 Silber [Ag]

Tabelle 11: Bewertung silberhaltiger Abfallströme

Zielelement: Silber [Ag]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert- Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 700 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte Fahrzeugelekt- ronik (insbesondere Leiter- platten) aus Altfahrzeugen						nicht vor- handen	Ja
Separierte Tantalkondensa- toren						nicht vor- handen	Nein (in Bezug auf Silber)


Zielelement: Silber [Ag]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert- Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 700 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte LED (Dotierungselement)						Sammlung von Alt- lampen	Nein

- Für dieses Metall nicht bewertet wurden Abfall- bzw. Stoffströme, deren Erfassung und Rückgewinnung bereits heute etabliert sind, wie z. B. separierte Leiterplatten aus Elektroaltgeräten, Schmuck, Münzen, etc. Durch deren Bündelung und oder Zwischenlagerung würde sich kein ökologischer Zusatznutzen ergeben.
- Solche Stoffströme könnten jedoch als Bündelungspartner für die ausgewählten Abfallströme relevant sein.
- Weitere Anwendungsgebiete bzw. Einzelanwendungen wurden nicht bewertet: z. B. (Glas)-Beschichtungen, etc.

2.1.2.2 Gold [Au]

Tabelle 12: Bewertung goldhaltiger Abfallströme

Zielelement: Gold [Au]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 43.280 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte Fahrzeugelektronik (insbesondere Leiterplatten) aus Altfahrzeugen						nicht vor- handen	Ja

Zielelement: Gold [Au]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 43.280 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte LED (Dotie- rungselement)						Sammlung von Alt- lampen	Nein

- Für dieses Metall nicht bewertet wurden Stoffströme, deren Erfassung und Rückgewinnung bereits heute etabliert sind, wie z. B. separierte Leiterplatten aus Elektroaltgeräten, industrielle Katalysatoren, Schmuck, Münzen, etc.
- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. Zahntechnik, Beschichtungen, etc.

2.1.2.3 Palladium [Pd]

Tabelle 13: Bewertung palladiumhaltiger Abfallströme

Zielelement: Palladium [Pd] Neuwarenwert: ~ 22.300 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte Fahrzeugelektronik (insbesondere Leiterplatten) aus Altfahrzeugen						nicht vorhanden	Ja

- Für dieses Metall nicht bewertet wurden Stoffströme, deren Erfassung und Rückgewinnung bereits heute etabliert sind, wie z. B. separierte Leiterplatten aus Elektroaltgeräten, Autokatalysatoren, industrielle Katalysatoren, Schmuck etc.
- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: Zahntechnik, etc.

2.1.2.4 Platin [Pt]

Tabelle 14: Bewertung platinhaltiger Abfallströme

Zielelement: Platin [Pt] Neuwarenwert: ~ 41.360 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte Sensoren (Lambda-Sonden), Zündkerzen, etc. aus Automobilen						z. T. gibt es erste Ansätze diese separat zu erfassen	Ja
Separierte Fahrzeugelektronik (insbesondere Leiterplatten) aus Altfahrzeugen (Platin spielt in Elektrogeräten eher eine unterge-						nicht vorhanden	Ja

Zielelement: Platin [Pt]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 41.360 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016)							
Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
ordnete Rolle)							
Umweltkatalysatoren (dezentrale Anwendung in heterogenem Kleingewer- be BHKW, katalyt. Nach- verbrennung z. B. Lackier- anlagen).						nicht vor- handen	Ja
Brennstoffzellen						nicht vor- handen	Ja

- Für dieses Metall nicht bewertet wurden Stoffströme, deren Erfassung und Rückgewinnung bereits heute etabliert sind, wie z. B. separierte Leiterplatten aus Elektroaltgeräten, Autokatalysatoren, industrielle Katalysatoren z. B. für die Hydrierungs-, Dehydrierungs- und Oxidationsprozesse (Lucas 2011; S. 17), Schmuck, etc.
- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. Medizintechnik, Glasindustrie, etc. Kein Thema in Bezug auf Zwischenlagerung, da Verwertungsverfahren der PGM, mit Ausnahme der Umweltkatalysatoren, bereits sehr gut etabliert ist

2.1.3 Bewertung Sondermetalle

2.1.3.1 Gallium [Ga]

Tabelle 15: Bewertung galliumhaltiger Abfallströme

Zielelement: Gallium [Ga] Neuwarenwert: ~ 381 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Beschichtungen von CIGS-Photovoltaikmodulen						PV-Module werden als eigenen Sammelgruppe erfasst	Ja
Separierte LED (Dotierungselement)						Sammlung von Alt-lampen	Nein
Separierte Laserdioden						nicht vorhanden	Nein
Separierte optische Bauteile bzw. Beschichtungen (Opto-Elektronik)						nicht vorhanden	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. IC / Mikrochips etc.

2.1.3.2 Germanium [Ge]

Tabelle 16: Bewertung germaniumhaltiger Abfallströme

Zielelement: Germanium [Ge] Neuwarenwert: ~ 1.380 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Glasfaserkabel						z.T. vor- handen	Nein
Separierte optische Bautei- le (Opto-Koppler)						nicht vor- handen	Nein
Separierte Katalysatoren (z. B. Polymerisation zur PET-Herstellung)						nicht vor- handen	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. Legierungen, Mikrochips, etc.

2.1.3.3 Indium [In]

Tabelle 17: Bewertung indiumhaltiger Abfallströme

Zielelement: Indium [In] Neuwarenwert: ~ 483 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte LCD-Display- Schichten						Bildschir- me wer- den in eigener Sammel- gruppe erfasst	Ja
Beschichtungen von CIGS- Photovoltaikmodulen						PV-Module werden als eigene Sammel- gruppe erfasst	Ja
Separierte LED (Dotierungselement)						Sammlung von Alt- lampen	Nein
Separierte Laserdioden						nicht vor- handen	Nein
Separierte optische Bautei- le bzw. Beschichtungen (Opto-Elektronik)						nicht vor- handen	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden wegen ihres geringen Mengenpotenziales nicht bewertet: z. B. spezielle Metalllegierungen bspw. für Thermometer (Galinstan), etc.

2.1.3.4 Tantal [Ta]

Tabelle 18: Bewertung tantalhaltiger Abfallströme

Zielelement: Tantal [Ta] Neuwarenwert: ~ 200 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte Tantalkondensa- toren						Separation von Leiter- platten aus Elektroalt- geräten	Ja
Metalllegierung (Insbeson- dere Schneidwerkzeuge) - separierte Teile						Erfassung meist über Altmittel	Nein
Separierte optische Bautei- le bzw. Beschichtungen (Opto-Elektronik)						nicht vor- handen	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. Produkte der Rüstungsindustrie, hitzebeständige Baustoffe, etc.

2.1.3.5 Cer [Ce]

Tabelle 19: Bewertung cerhaltiger Abfallströme

Zielelement: Cer [Ce] Neuwarenwert: ~ 4,5 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Poliermittel i.d.R. als Schlamm (optische Industrie)						Nahezu vollständige Erfassung in der optischen Industrie	Ja
Separierte Katalysatoren (z. B. FCC, sowie weitere)						Erfassung in Raffinerien	Ja
Separierte Autokatalysatoren						Autokatalysatoren werden separat erfasst	Ja
Separierte Leuchtstoffe (z. B. Leuchtstoffröhren)						Sammlung von Alt-lampen und Abtrennung von Leuchtstoffen	Ja
Separierte LED (Dotierungselement)						Sammlung von Alt-lampen	Nein
(NiMH)-Batterien						Für Altbatterien vorhanden	Ja
Separierte Spezialgläser / Keramiken (z. B. Linsen)						nicht vorhanden	Ja

Zielelement: Cer [Ce]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 4,5 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte Teile mit Metall- legierung (z. B. Zündsteine - Auerme- tall, Schmelzzusatz)						Erfassung meist über Altmetall	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. chemische Standards, Cerimetrie, etc.

2.1.3.6 Lanthan [La]

Tabelle 20: Bewertung lanthanhaltiger Abfallströme

Zielelement: Lanthan [La]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 4,5 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Poliermittel i.d.R. als Schlamm (optische Industrie)						Nahezu vollständige Erfassung in der optischen Industrie	Ja
Separierte Katalysatoren (z. B. FCC, sowie weitere)						Erfassung in Raffinerien	Ja

Zielelement: Lanthan [La]	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Neuwarenwert: ~ 4,5 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016)							
Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)							
Separierte Autokatalysatoren	●	●	●	●	●	Autokata- lysatoren werden separat erfasst	Nein (in Bezug auf Lanthan)
Separierte Leuchtstoffe (z. B. Leuchtstoffröhren)	●	●	●	●	●	Sammlung von Alt- lampen und Ab- trennung von Leuchtstof- fen	Ja
(NiMH)-Batterien	●	●	●	●	●	Für Altbat- terien vor- handen	Ja
Separierte Spezialgläser / Keramiken (z. B. Linsen)	●	●	●	●	●	nicht vor- handen	Ja
Separierte Teile mit Metall- legierung (z. B. Zündsteine, Schmelz- zusatz)	●	●	●	●	●	Erfassung meist über Altmetall	Nein
Separierte Kathode aus Brennstoffzellen	●	●	●	●	●	nicht vor- handen	Nein

Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. chemische Standards, Kondensatoren, Medikamente, etc.

2.1.3.7 Seltenerdmetalle (nur Neodym [Nd], Dysprosium [Dy] und Praseodym [Pr])

Tabelle 21: Bewertung neodym-, dysprosium- und praseodymhaltiger Abfallströme

Zielelement: Neodym [Nd] und [Dy], ggf. [Pr] Neuwarenwert: ~ 51 €/kg (USGS Mittelwert 2012 bis 2016) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Pro- jektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsauf- wand / Wertpoten- zial	D) Verwertungspro- zess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte Magnetwerk- stoffe (z. B. Windkraftanla- gen, Klimageräte, etc.)						Separate Erfassung größerer Motoren	Ja
(NiMH)-Batterien						Für Altbat- terien vor- handen	Ja
Separierte Teile mit Metall- legierung						Erfassung meist über Altmetall	Nein
Separierte Katalysatoren (z. B. Neodym, Praseodym, etc.)						z.T. vor- handen	Nein

- Weitere Anwendungsgebiete wurden nicht bewertet: z. B. Glasadditive, Keramiken, Automobil-Katalysatoren, etc.

2.1.3.8 Weitere SEE

Tabelle 22: Bewertung weiterer SEE-haltiger Abfallströme

Zielelement: Weitere SEE Neuwarenwert: ~ 283 €/kg (USGS Mittelwerte der Jahre 2012 bis 2016 der Elemente Dysprosium, Europium, Praseodym und Yttrium) Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Kriterien						Berücksichtigung im weiteren Projektverlauf
	A) Wert-Konzentration	B) Mengenpotenzial	C) Separationsaufwand / Wertpotenzial	D) Verwertungsprozess	E) Informationslage	F) Erfassungs- / Bündelungssystem	
Separierte LED (Dotierungselement z. B. Yttrium, Europium, etc.)	●	●	●	●	●	Sammlung von Alt-lampen	Nein
Separierte Leuchtstoffe (z. B. Leuchtstoffröhren, CRT-Bildschirme, LCD-Bildschirmgeräte, z. B. Yttrium, etc.)	●	●	●	●	●	Sammlung von Alt-lampen und Ab-trennung von Leuchtstof-fen	Ja
Separierte Spezialgläser / Keramiken (z. B. Yttrium, etc.)	●	●	●	●	●	nicht vor-handen	Ja
Separierte Teile mit Metall-legierung (z. B. Gadolinium, Holmium, etc.)	●	●	●	●	●	Erfassung meist über Altmetall	Nein
Separierte Leiterplatten mit Spuren an SEE	●	●	●	●	●	vorhanden	Nein
Separierte Magnetwerk-stoffe (z. B. Samarium, etc.)	●	●	●	●	●	nicht vor-handen	Nein
Separierte thermische Be-schichtungen (TBC mit Yttrium)	●	●	●	●	●	nicht vor-handen	Nein
Separierte Supraleiter (Yttrium)	●	●	●	●	●	nicht vor-handen	Nein

2.1.4 Relevante Anwendungsgebiete und ihre Elemente

Mit Hilfe der oben aufgeführten Bewertung wurden 14 Abfallströme identifiziert, die für die weitere Analyse geeignet sein könnten. Eine nähere Betrachtung dieser Abfälle bzw. Bündelungsebenen und der enthaltenen Edel- und Sondermetalle unter ökologischen Gesichtspunkten anhand des Leitparameters Global Warming Potenzial (GWP) und mit Blick auf weitere Gesichtspunkte führt zu folgenden Ergebnissen:

- **Brennstoffzellen:** Mengenaufkommen sehr gering; ob und in welcher Ausgestaltung der Brennstoffzellen es in Zukunft zu einem erheblichen Mengenwachstum kommt, ist derzeit nicht abzusehen. Die Informationslage ist dementsprechend sehr unbefriedigend. **Dieser Abfallstrom wird im Projekt nicht weiterverfolgt.**
- **Beschichtungen von CIGS-Photovoltaikmodulen:** nach Zimmermann (Zimmermann 2014) und Marscheider Weidemann (Marscheider Weidemann 2016) liegen die Konzentrationen von Indium und Gallium in CIGS-Photovoltaikmodulen bei ca. 0,1 Promille. Mit dem GWP nach ecoinvent v3.3 ergibt sich daraus ein GWP von 10 bzw. 20 g CO₂-Eq pro kg Modul. **Dieser Abfallstrom wird im Projekt nicht weiterverfolgt.**

Tabelle 23 zeigt die verbleibenden 12 Abfallströme und die ihnen zugeordneten Themenbereiche.

Tabelle 23: Relevante Abfallströme mit Zuordnung zu den Themenbereichen der Untersuchung

Anwendungsgebiete (Bündelungsebene)	Relevante Elemente	Bündelung	Informationsbereitstellung	Zwischenlagerung
EDELMETALLE				
Separierte Fahrzeugelektronik (Leiterplatten) aus Altfahrzeugen	Ag, Au, Pd, Pt	X	X	
Separierte Sensoren (Lambda-Sonden), Zündkerzen, aus Automobilen	Pt	X	X	
Umweltkatalysatoren	Pt	X	X	
SONDERMETALLE				
Separierte LCD-Display-Schichten	In	X	X	X
Separierte Tantalkondensatoren	Ta	X	X	
Poliermittel i.d.R. als Schlamm (optische Industrie)	Ce, La	X	X	X
Separierte Katalysatoren (z. B. FCC, sowie weitere)	Ce, La	X	X	X
Separierte Autokatalysatoren	Ce	X	X	X
Separierte Leuchtstoffe (z. B. Leuchtstoffröhre)	Ce, La, SEE	X		X
(NiMH)-Batterien	Ce, La, Nd	X		X
Separierte Spezialgläser / Keramiken (z. B. Linsen)	Ce, La	X	X	X
Separierte Magnetwerkstoffe (z. B. Windkraftanlagen, Klimageräte, etc.)	Nd, Dy, Pr	X	X	X

Ein Thema des Vorhabens ist die Bündelung von Abfällen unterschiedlicher Art und Herkunft mit Blick auf die zurückzugewinnenden Metalle. Die Tabelle 24 zeigt eine Zuordnung der Abfälle zu den relevanten

ten Edel- und Sondermetallen sowie eine Gruppierung nach Ähnlichkeit der stofflichen Zusammensetzung. Einige Abfälle sind in dieser Darstellung weiter ausdifferenziert.

Tabelle 24: Ausgewählte Edel- und Sondermetalle und deren zu untersuchende Anwendungsgebiete mit Zuordnung zu den Themenbereichen der Studie

Relevante Elemente	Anwendungsgebiete (Abfallströme)	Bündelung	Informationsbereitstellung	Zwischenlagerung
1) Edelmetalle		X	X	
Ag, Au, Pd, Pt	Separierte Leiterplatten aus Altfahrzeugen			
	Separierte Sensoren (Lambda-Sonden), Zündkerzen, aus Automobilen			
	Umweltkatalysatoren			
2) Sondermetalle		X	X	X
In	Separierte LCD-Display-Schichten			
Ta	Separierte Tantalkondensatoren	X	X	
3) Seltenerdmetalle (Ce, La)		X	X	X
Ce, La	Poliermittel i.d.R. als Schlamm (optische Ind.)			
	Spezialgläser, Keramiken			
	Separierte Katalysatoren (im Speziellen FCC-Katalysatoren)			
	Separierte Autokatalysatoren (Schlacken aus Aufbereitung)			
Ce, La, Nd	NiMH-Batterien (Mischmetallfraktion aus Aufbereitung)			
4) Seltenerdmetalle (Leuchtstoffe)		X		X
Yttrium, Europium, etc.	Separierte Leuchtstoffe aus Leuchtstoffröhre			
	Separierte Leuchtstoffe aus CRT-Geräten			
	Separierte Leuchtstoffe aus LCD			
5) Seltenerdmetalle (seprierte Magnetwerkstoffe)		X	X	X
Nd, Dy, Pr, u.a.	Festplatten oder Festplattenmagnete			
	Magneten aus Kopfhörern, Lautsprechern			
	Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern			
	Magnete aus Nabendynamos von Fahrrädern			
	Magnete aus Elektrofahrzeugen (Antrieb)			
	Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw			
	Magnete aus Industriemotoren			
	Magnete aus Windenergieanlagen			
	Magnete aus Raumklimaanlagen			
	Magnete aus medizinischen Geräten (z.B. MRT)			

2.2 Grundlagen der Erfassungslogistikkonzepte und Gestaltung der Informationsflüsse zur Bündelung und Behandlung von Abfällen

2.2.1 Basis der Ausarbeitungen – Verständnis und Effizienzprinzipien im Logistikmanagement

Logistik als eigenständige wissenschaftliche Disziplin ist in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts entstanden. Seitdem hat sich die Logistik in Selbstverständnis und Aufgabenbereich rasant entwickelt.

Zunächst wurden mit Transport, Umschlag und Lagerung logistische Kernaktivitäten fokussiert. Dieser Ansatz wird als **TUL Logistik** benannt und ist in der Regel stark davon getrieben die Kosten für die genannten Kernaktivitäten zu reduzieren.

In den 70er Jahren wurde Logistik als verbindende Querschnittsfunktion entlang der Wertschöpfungskette und quer durch alle Funktionen der Unternehmen (Beschaffung, Produktion, Absatz) wahrgenommen. Im Fokus stand hier die Logistik als verbindendes Element zwischen nahezu unabhängig agierenden Funktionsbereichen der Unternehmen. Logistik wurde auf den Schnittstellen eine **Koordinationsfunktion** zugesprochen. Eine der am häufigsten zitierten Definitionen der Logistik spiegelt diese Koordinationsfunktion wieder: Die „7 Rights“¹ müssen auf den Schnittstellen zwischen vorgelagerter und nachgelagerter Stufe ausgehandelt werden, um eine koordinierte Zusammenarbeit zu ermöglichen. Zudem steht hier der Versorgungsgedanke klar im Zentrum.

Aktuelles Selbstverständnis der Logistik ist das **Management von Fließsystemen**. Objekte (Rohstoffe, Halbfertigwaren, Fertigwaren, Verpackungen, etc.), aber auch Informationen fließen durch Netzwerke aus Unternehmen oder detaillierter: durch Unternehmensteile. Geschwindigkeit und unterbrechungsarme Geradlinigkeit der Flüsse sind Optimierungsziele. Die Querschnittsfunktion spiegelt sich in der Durchgängigkeit der Flüsse wieder, d.h. konkret: Funktionsbereiche werden aufgelöst und Schnittstellen grundsätzlich hinterfragt. Die Leistungserstellung gewinnt dadurch an Effizienz und z.T. auch an Flexibilität. Damit ist Logistik allerdings auch kein Funktionsbereich eines Unternehmens – wie sie gerne noch verstanden wird – sondern eine grundsätzliche Denkweise, die auch in den klassischen Bereichen Beschaffung, Produktion und Absatz erfolgreich Einzug hält. In diesem Verständnis der Logistik ist auch der Begriff des **Supply Chain Management (SCM)** zu verorten. Dahinter verbergen sich grundsätzliche Ansätze und konkrete Tools, um unternehmensübergreifend Informations-, Güter- und Finanzflüsse zu optimieren (vgl. Klaus 2002; S. 102ff und Klaus 2007; S. 49ff).

Letzteres Verständnis der Logistik stellt den Kundennutzen in den Vordergrund und orientiert sich primär an diesem. Damit versteht sich die Logistik auch als Leistungsträger und nicht nur als reine Kostenstelle eines Unternehmens. Mit Blick auf die Bedeutung, die Logistik im Leistungsbündel z.B. von Amazon einnimmt, ist dies heutzutage kaum zu hinterfragen.

Das Ziel der Kundenorientierung wird mit kettenübergreifender Optimierung verfolgt. Hierzu werden folgende Standardproblemstellungen, praktische Lösungsprinzipien und standardisierte Lösungsansätze vorgeschlagen (Tabelle 25). Ziel ist neben der Leistungserstellung auch die Kostenkontrolle: In der Regel soll eine definierte Leistung für den Kunden zu möglichst geringen Kosten erstellt werden.

¹ Als „7 Rights der Logistik“ werden die sieben Zielsetzungen der Logistik bezeichnet: Die richtige Ware, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, beim richtigen Kunden zu den richtigen Kosten. Diese bauen auf den ursprünglich „5 Rights“ von Plowman auf, welche später von verschiedenen Autoren um zwei weitere ergänzt wurden. Vgl. Plowman 1964; S. 2.

Tabelle 25: Gestaltungsparameter zur Optimierung von Fließsystemen nach Klaus; Quelle: Eigene Darstellung nach Klaus (2002; S. 90f.)

A) Standardproblemstellungen	B) Praktiker-Hypothesen und „Prinzipien“	C) Standardlösungsansätze
<p>Wie können Flusskosten gesenkt werden?</p> <p>Insbesondere im Bereich der Distributionsflüsse, Materialbeschaffungsflüsse, Fertigungsflüsse, administrativen Prozesse, Reduzierung von Handlingaufwänden, Reduzierung von Steuerungsaufwänden, Reduzierung von Transportkosten.</p>	<p>Eine Netzkonfiguration ist logistisch umso besser, je...</p> <p>kürzer, gerader, weniger unterbrochen die Verkettungen zwischen kritischen Quellen und Senken sind,</p> <p>stärker zeitlich/räumlich aufeinanderfolgende Aktivitäten gebündelt und verkettet sind,</p> <p>enger die Koppelung, bzw. je perfekter die Integration von physischen Flüssen mit auf sie bezogenen Informationsflüssen ist (Visualisierung, Andon)</p> <p>und je weiter „flussaufwärts“ Lager- und Umschlagspunkte und je weiter „flussabwärts“ wertschöpfungsintensive, kundenspezifische Aktivitäten platziert werden können und je höher die „Integrität“ von Kundenbedürfnis, Produkt und Prozess ist.</p>	<p>Optimierte Netzkonfiguration</p> <p>insbesondere durch Kettenverkürzung, Netzstrukturvereinfachung, Fließinselbildung, höhere Netzintegration, Flussaufwärts-Positionierung von Koppelungspunkten.</p>
<p>Wie Objektwerte steigern?</p> <p>Insbesondere durch erhöhte Verfügbarkeit, größere Schnelligkeit, bessere Planbarkeit, Identifikation der Kundenbedürfnisse, Erfüllung der Kundenwünsche.</p>	<p>Flüsse sind umso rationeller, je...</p> <p>weniger „Medienbrüche“ entlang des Flusses erfolgen (durchgängige IT Lösungen),</p> <p>gleichmäßiger und rascher der Fluss ist (Nivellierung der Bedarfe),</p> <p>früher und robuster Fehlervermeidung einsetzt (Poka Yoke),</p> <p>kräftiger die Alarmsignale bei dennoch auftretenden Fehlern und Überlastungserscheinungen sind,</p> <p>höher der Überlappungsgrad aufeinanderfolgender Prozesse ist und je besser die Übergabeprozesse an Schnittstellen abgestimmt sind.</p>	<p>Kontinuierliche Netzrationalisierung</p> <p>Eliminierung von Schnittstellen-Brüchen</p> <p>vorsteuernde Fehlervermeidung</p> <p>Fehler-Signalverstärkung</p>
<p>Wie die Netz- bzw. Systemadaptionfähigkeit und Überlebensfähigkeit verbessert werden kann?</p> <p>Insbesondere durch Objektbestände vermeiden (Reduzierung von Be-</p>	<p>Für die operative Flusststeuerung und -regelung sind zu bevorzugen...</p> <p>bedarfsorientierte gegenüber ressourcenorientierter Steuerung, Hol-Systeme gegenüber Bringsystemen (Pull-System),</p> <p>individualisierte, objektnahe Steuerungen gegenüber Steuerungen auf Basis aggregierter Auslöseinformationen und</p>	<p>Verbesserte Steuerung</p> <p>Bedarfs-/ Engpassorientierung</p> <p>Flussglättung</p> <p>Impulsreduktion</p>

ständen in einer Lieferkette), Schlankheit der Strukturen und Reaktionsschnelligkeit.	interne Selbstregelungssysteme gegenüber externen, analytischen Steuerungssystemen.	
---	---	--

Entsorgungs- oder auch Recyclinglogistik ist bei Betrachtung des Gesamtsystems und aus makroökonomischer Sicht extrem sinnvoll. Auf Ebene der Mikroökonomik, also auf Ebene einzelner Betriebe, ist dies schwieriger: Makroökonomische Zielsetzungen werden nicht immer durch einen „Kunden“ vertreten und damit ist die Kundenorientierung als Motivation für Entsorgungslogistik ein schwer zu verortendes Thema². Deshalb greifen auch nicht alle Konzepte der Logistikoptimierung ohne Weiteres in diesem Bereich. Um dies zu verdeutlichen, wurden folgende grundsätzlichen Überlegungen und einige Herausforderungen, die bei einer Übertragung von Konzepten berücksichtigt werden müssen, hier angeführt:

- Der Käufer des (Sekundär-)Rohstoffs ist Empfänger einer Entsorgungs- bzw. Verwertungslogistik und hat einen Bedarf, der durch Angebote aus Rohstoffabbau in der Natur gedeckt werden kann. Mit diesen Wertschöpfungsketten konkurriert die Recycling-Kette.
- Punkt eins hebt auch die Versorgungslogik aus. Letztlich steckt bereits im Begriff die andere Prämisse: Versorgung tritt in den Hintergrund und Entsorgung steht im Fokus. Im Sinne einer wirtschaftlich arbeitenden Kreislaufwirtschaft ist Endpunkt der Entsorgungslogistik bestenfalls wieder ein Markt, der mit Rohstoffen versorgt werden soll. Dieser Bedarf kann allerdings u.U. bereits aus anderer Quelle günstiger gedeckt werden.
- Wenn Kernfunktionen aus der TUL-Logistik fokussiert werden, dann reduziert sich Logistik in der Entsorgung bzw. im Recycling auf eine reine Kostensenkungsfunktion. Dies ist nicht problematisch, beschränkt aber deutlich den Spielraum neuer Konzepte, da zusätzliche Leistungsfähigkeit nicht gefragt ist.
- Besonders Beschleunigung von Prozessen (Geschwindigkeit) wie auch die Senkung von Beständen (was der Bündelung widerspricht) spielt bei der herkömmlichen Logistik eine deutlich wichtigere Rolle als dies für die Recycling Logistik angenommen werden kann. Grund ist, dass Bestände a) aufgrund der Wertigkeit eine meist geringe oder gar keine Kapitalbindung verursachen und b) evtl. kein Kunde auf Versorgung wartet sowie c) Bündelung, also gezielte Kumulation von Beständen zur effizienten Umsetzung von Prozessen sinnvoll ist.
- Zusammenfassend ist neue Leistungsfähigkeit der Logistik nur dann gefragt, wenn der Nutzen des Kunden (Käufer des Rezyklates oder Nachfrager der Entsorgungslogistik) dadurch steigt und der Kunde bereit ist, dafür auch mehr zu bezahlen. Der Käufer des Rezyklates hat aber aktuell ein alternatives, ggf. kostengünstigeres Angebot aus dem Abbau natürlicher Ressourcen. Der Nachfrager der Entsorgungslogistik misst die Leistung nur an der gesetzeskonformen Entsorgung unabhängig von logistischer Leistung.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen sind die im Weiteren zu diskutierenden Konzepte immer daran ausgerichtet, Kosten in der Recyclingkette zu reduzieren (vgl. Göpfert 2012; S. 155-161).

Zur Effizienzsteigerung werden seit der Industrialisierung zwei wesentliche Effekte als quasi Naturgesetz betriebswirtschaftlicher Effizienzsteigerung angenommen und gelten auch als empirisch belegt:

² Der Kunde fragt einen Rohstoff nach. Die Quelle des Rohstoffs ist zunächst nicht relevant, es sei denn der Kunde legt explizit Wert auf Recycling. Wenn also Kundenorientierung als reine Erfüllung der Nachfrage nach Rohstoffen interpretiert wird, dann sind ganze Recycling-Ketten zu hinterfragen. Entsprechend muss die Kundenorientierung um Nebenaspekte der Nachfrage z.B. die Anforderung an Nachhaltigkeit etc. gedanklich ergänzt werden. Dies ist aber extrem schwer operationalisierbar.

Skaleneffekte (Economies of scale), also sinkende Stückkosten bei steigender Produktions- bzw. Leistungsmenge, begrenzt durch Maximalauslastung der Anlagen. Auf die Logistik übertragen verteilen sich die Kosten für einen LKW auf 30 Paletten bei Vollauslastung oder auf nur eine Palette bei deutlicher Unterauslastung. Die Fixkosten pro transportierte Palette sind bei 30 transportierten Paletten, also bei einer größeren Menge, deutlich niedriger. Daraus abgeleitet ergibt sich zur Kostenoptimierung die Aufgabe zur Bündelung oder besser die Aufgabe zur Auslastung der Anlagen (z.B. des LKWs).

Verbundeffekte (Economies of scope), also die gleichzeitige Wirkung eines Leistungsschritts auf zwei Produkte oder Leistungsbestandteile. Dabei werden durch Bündelung auf derselben Wertschöpfungsstufe parallel zwei Produkte bearbeitet oder durch Verkettung Produkte auf sequenziellen Wertschöpfungsstufen miteinander bearbeitet. In der Logistik gibt es einen wesentlichen Bündelungseffekt in Form eines Kuppelproduktes: Die Rückfracht. Bei einem Transport muss das Transportmittel in der Regel wieder zurückgeführt werden und ist dabei zunächst leer. Eine weitere Bündelungsaufgabe ist also die Auslastung der Rückfracht.

Neben diesen beiden Effekten spielt gerade in der Logistik auch der **Dichtevorteil (Economies of density)** eine Rolle. Dieser bezeichnet die Effizienzsteigerung, die erreicht werden kann, wenn Aktivitäten in räumlicher Nähe abgewickelt werden können. In der Logistik fallen durch räumliche Nähe Transportkosten weg. Die daraus abgeleitete Aufgabe ist die räumliche Bündelung von Aktivitäten.

Mit den genannten Effekten direkt verbunden sind zwei grundlegende Vorgehensweisen, die sowohl in der industriellen Produktion als auch bei der Erstellung von Dienstleistungen immer wieder zu finden sind und quasi eine Operationalisierung der Effekte darstellen.

Bei der Vereinfachung gilt es, nicht wertschöpfende Vielfalt zu reduzieren und mit nur einer Variante, also „einfach“ zu arbeiten. Im Rahmen der betrieblichen Umsetzung entspricht dies dem Ziel der **Standardisierung**. Treiber der Standardisierung sind Kosten, die durch Handhabung oder neudeutsch „Handling“ verbunden sind und sich in Personalkosten niederschlagen. Einfaches Handling reduziert den zeitlichen Personalaufwand pro Leistungseinheit. Ziel ist es dabei, die Lohnstückkosten pro Leistungseinheit zu drosseln, indem mehr Leistung pro Mitarbeiterstunde erbracht wird. Standardisierung ist mit „Economies of scale“ verbunden. Wenn gleiche Tätigkeiten oft durchgeführt werden, entsteht der oben beschriebene Skaleneffekt.

Neben der Vereinfachung spielt die **Arbeitsteilung** eine Rolle. Dabei ist eine organische Arbeitsteilung gemeint, d.h. nicht den gleichen Arbeitsgang auf mehrere Personen zu verteilen (dies entspräche der mechanischen Arbeitsteilung), sondern Personen auf bestimmte Tätigkeiten zu spezialisieren und unterschiedliche Arbeitsgänge in Sequenz abarbeiten zu lassen (organische Arbeitsgänge). Aufgabe ist dabei die intelligente Verteilung der Arbeit entlang einer Wertschöpfungskette auf unterschiedliche Stellen. Dabei sollten die Arbeitsgänge ausgewogen sein und den Möglichkeiten bzw. Qualifikationen der Mitarbeiter entsprechen. Resultate dieser Spezialisierung sind schnelle Lernkurven und Verbesserungen in Qualität und Geschwindigkeit der einzelnen Arbeitsgänge. Dies entspricht i.d.R. den Effekten der „Economies of scale“ und „Economies of scope“ in einem Mikrosystem einzelner Arbeitsschritte. Hinzu kommen oftmals Verdichtungseffekte durch die räumliche Nähe der Aktivitäten an einem Arbeitsplatz.

Alle drei oben genannten Bündelungsrichtungen sowie die operationalisierte Umsetzung in Standardisierung und Arbeitsteilung werden im Folgenden aufgegriffen und in die Überlegungen zu Konzepten für die Entsorgungslogistik/Recyclinglogistik einbezogen.

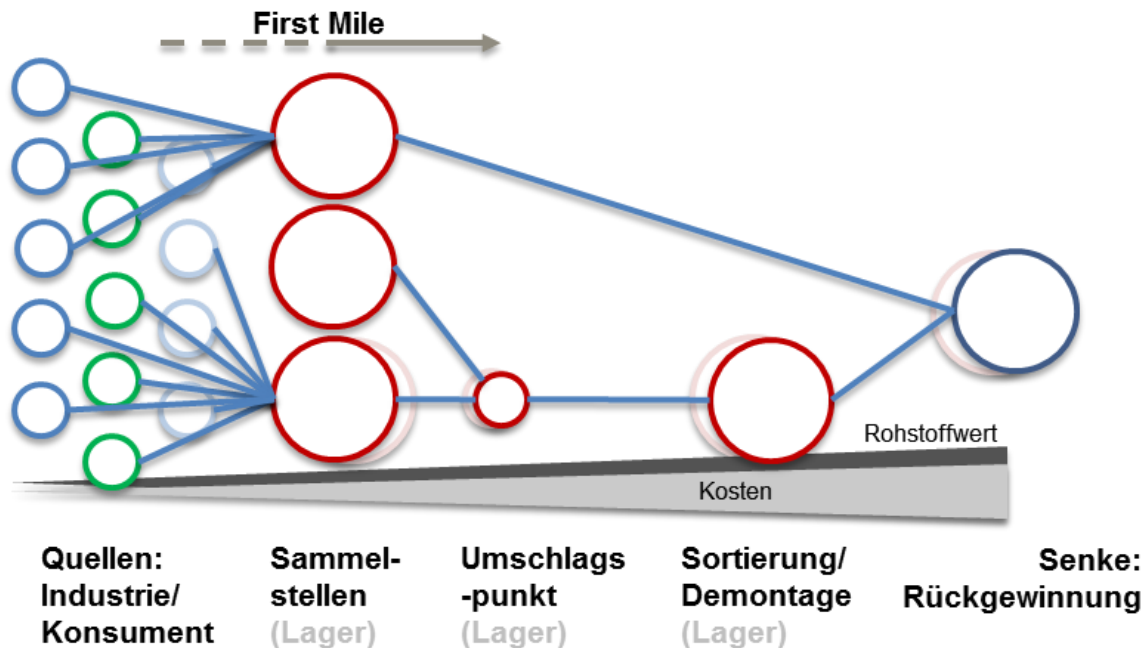
2.2.2 Ausgangssituation als Knoten-Kantenmodell edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme

Für jeden Abfallstrom wurde ein Knoten-Kanten-Modell erarbeitet, das die aktuelle logistische Situation entlang der gesamten Recyclingkette zeigt. Knoten sind in diesem Zusammenhang Sammelstellen, Demontagebetriebe, Lager etc. Kanten stellen die Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten dar

und sind somit die logistische Schnittstelle zwischen den Knoten der Recycling-Kette. Das Projekt ILESA fokussiert den Teil des Abfallstromes von der Separierung ausgehend (vgl. Tabelle 20). Betrachtet man den gesamten Abfallstrom, beginnt dieser bei der Beendigung des vorherigen Nutzens und endet bei der Zuführung zum nächsten Nutzen oder bei der Deponierung. Das Knoten-Kanten-Modell ist folgendermaßen aufgebaut:

- Quellen der Abfallströme entsprechen dem letzten Nutzer des Produktes, das entsorgt werden soll und dessen Bestandteile recycelt werden sollen.
- Sammelstellen sind Orte, an welchen Produkte/Objekte im ersten Schritt zusammenlaufen. Für unterschiedliche Abfallströme können dies unterschiedliche Sammelstellen sein (z.B. kommunale Wertstoffhöfe, Altfahrzeugdemontagebetriebe oder Batteriesammelcontainer etc.).
- First Mile Logistik entspricht dem Weg von der Quelle zur Sammelstelle bzw. dem Weg von der Sammelstelle zur Behandlung oder von der ersten zu weiteren Behandlungs-/ Verwertungsstufen, je nachdem, wo der unternehmerisch gesteuerte logistische Prozess beginnt.
- Prozessschritte der Sortierung und Demontage stellen Knoten im logistischen Netz dar (Wertsteigerung durch Sortenreinheit oder Entfernung von Störstoffen und Fremdmaterialien, aber auch Bündelung von Stoffströmen).
- Senken sind die Endpunkte der Verwertung (Rückgewinnungsbetrieb). Hier ist der Maximalwert der Aufbereitung erreicht: Diese sind Rückgewinnungsanlagen und (Sekundär-)Rohstofflager, aus welchen der gewonnene (Sekundär-)Rohstoff oder andere marktfähige Produkte wieder am Markt angeboten werden können (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 5: Generische logistische Situation und Prozessschritte in der Entsorgungslogistik;
Quelle: eigene Darstellung



Anmerkungen:

- Die Darstellung zeigt mehrere optionale Konfigurationen.
- Sortierung und Demontage können auch in der Sammelstelle oder im Umschlagspunkt des Dienstleisters erfolgen.
- Es sind nicht immer alle Knoten notwendig.
- Die Lagerhaltung kann in allen Knoten stattfinden und unterschiedlich dimensioniert sein.
- Wenn der Kunde/die Industrie Wertstoffe nicht zur Sammelstelle bringen, dann startet die First Mile bei der Quelle.

Aufbauend auf der erarbeiteten logistischen IST-Situation, den logistischen Herausforderungen, den Knoten-Kanten-Modellen sowie den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegenden Stoffströme ein generisches Prozessmodell entwickelt, um die Effizienzsteigerungsansätze auf generische Prozessabschnitte zu beziehen und deren operative Umsetzung in den Abschnitten zu beschreiben. Dabei wurde auf Experteninterviews mit Praktikern der Recyclingwirtschaft³ zurückgegriffen und es wurden aktuelle logistische Konzepte adaptiert. Ergänzend wurden Ansätze aus Industrie 4.0 bzw. der Digitalisierung betrachtet.

Der Aufbau der Recycling-Kette (vgl. Abbildung 5) bildet das Grundgerüst der generischen Logistik-Matrix, die Herausforderungen (Kapitel 2.2.3) und Lösungsansätze (Kapitel 2.2.4) im Überblick zeigt.

Die generischen Herausforderungen in der Matrix sind in der tatsächlichen Umsetzung von der Ausprägung des jeweiligen Stoffstroms und dessen Objekten/Produkten und der Ausgestaltung der Recyclingkette abhängig. Die Eigenschaften der Objekte/Produkte und der Kette beziehen sich dabei auf:

³ Informell interviewt wurden Teilnehmer des ersten Workshops im Rahmen der Gespräche am 10. Mai 2017 im UBA in Berlin sowie im Nachgang mittels strukturiertem Leitfadeninterview die PDR Recycling GmbH + Co KG, die Lightcycle Re-tourlogistik und Service GmbH und der NH/HH-Recycling e. V.

- Eigenschaften der Knoten, insbesondere Kapazitäten (Mengenaufkommen pro Zeiteinheit bzw. in Verarbeitungsknoten die Verarbeitungsmenge pro Zeiteinheit), Anzahl und Position der Knoten.
- Beziehungen der Knoten zueinander (Entfernung und Reihenfolge des Durchlaufs).
- Eigenschaften der Kanten, z.B. abgeleitet aus der Position der Knoten, die Distanzen zwischen den Knoten, verfügbare Infrastruktur und Eigenschaften möglicher Transportlösungen (LKW, Bahn, Binnenschiff).
- Mengengerippe, bestehend aus der Menge der Rohstoffe, gemessen an den jeweiligen Objekten (Altauto oder Elektromotor), in welchen die Rohstoffe in den Quellen anfallen. Sofern möglich, heutige Mengen, die durch ein Knoten-Kanten-Modell laufen.
- Objekteigenschaften Brutto (mit umgebenden anderen Materialien), Netto (Menge der adressierten Rohstoffe in Reinform), Tara, (umgebende Menge/Verpackung) insbesondere auch Transporthilfsmittel/Behälter wie Trailer, Wechselbrücken, Container, Gitterboxen, Rungen, Paletten oder Kartonagen.
- Kostenaspekte bestehend im Wesentlichen aus Transportkosten, Handhabungskosten im Umschlag und Lagerhaltungskosten sowie administrativen Kosten z.B. für Disposition. Bestandskosten im Sinne einer Kapitalbindung wie bei dem primären Wertschöpfungsprozess spielen meist keine oder eine untergeordnete Rolle.⁴
- Marktaspekte für die Senke bestehend aus Marktpreisen, Entwicklungsperspektive und Rohstoffeigenschaften, die gefordert werden.
- Wertdichte (Rohstoffwert bezogen auf Volumen/Gewicht des Träger-Objektes) in den jeweiligen Verarbeitungsstufen (Wertdichte sollte durch Verarbeitung stetig steigen).

2.2.3 Ein generisches Modell logistischer Herausforderungen in der Recycling-Kette edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme

Aus dem Knoten- und Kanten-Modell wurde ein generisches Prozessmodell für die betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme entwickelt. Dieses gliedert sich einerseits in Stufen, welche die Knoten darstellen, und andererseits in drei Ebenen: physische Ebene der Güterströme, informativische Ebene der Daten und Informationen zur Steuerung der Güterströme und die Ebene der Finanzen, welche Anreize und letztlich Motivation zum betrieblichen Handeln darstellt (vgl. Otto 2002; S. 248 und Krupp 2012; S. 39). In Tabelle 26 sind die genannten Stufen in Spalten dargestellt und die Ebenen in Zeilen strukturiert. Begonnen wird mit den Sammelstellen, die als gegeben vorausgesetzt werden. In den Zellen, die sich in der Tabelle ergeben, sind die Herausforderungen zusammengefasst, die sich in den Stufen und auf der jeweiligen Ebene ergeben. Diese Herausforderungen sind spaltenweise nummeriert und werden in der Tabelle kurz umrissen und entsprechend der Nummerierung weiter unten genauer erläutert.

Im Anschluss an die Darstellung der Herausforderungen werden in Kapitel 2.2.4 Lösungsansätze aufgezeigt, mit welchen in unterschiedlichen Branchen versucht wird, diesen Herausforderungen zu begegnen. Die Lösungsansätze sind an der gleichen tabellarischen Logik orientiert und der derselben Nummerierung folgend gekennzeichnet.

⁴ Zu den unterschiedlichen Kosten vgl. auch den entsprechenden Exkurs im Anhang 3.

Tabelle 26: Ausgewählte Herausforderungen einer generischen Recycling-Kette; Quelle: eigene Darstellung

	1. Sammelstelle	2. Sortierung und Demontage	3. Rückgewinnung
Physische Ebene	1.1 Problematik der First Mile Zeitliche und stoffliche Bündelung Organisation von Behältersystemen Nutzungsadäquate Handhabung in Sammelstellen	2.1 Positionierung von Sortierung und Demontage in Recycling-Kette Optimierung manueller Prozesse zur Reduzierung von Lohnstückkosten	3.1 (Intralogistik) Produktions-/aufbereitungsnahe Lagerhaltung Lagerung von Behältern Logistische Bearbeitung von Kuppelprodukten
	1.2 Steuerung von Sammelprozessen Auslösung von Abholungen Planbarkeit der Mengen Freiheitsgrade für Planungsprozesse Reduzierung von Stoppkosten/Stoppszeiten	2.2 Identifikation von Wertstoffen Information zu Zugänglichkeit für Demontage Zusammenstellung und Bereitstellung von Demontageinformationen in Kette	3.2 (Steuerung der Intralogistik) Planung der Distribution der Produkte durch Allokation von Angebot und Nachfrage
	1.3 Rechtliche Verpflichtungen Wirtschaftliche Attraktivität Wechselwirkung beider Aspekte	2.3 Steigerung der wirtschaftlichen Attraktivität durch Strukturierung der Lernkurve	3.3 Erläusoptimierung vs. Kundenbindung Logistische Aufwände für Nebenprodukte
Finanzielle Ebene/ Motivation/Anreiz	4. Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion		

2.2.3.1 Sammelstellen

2.2.3.1.1 Zu 1.1 Herausforderungen auf physischer Ebene bei Anbindung der Sammelstellen

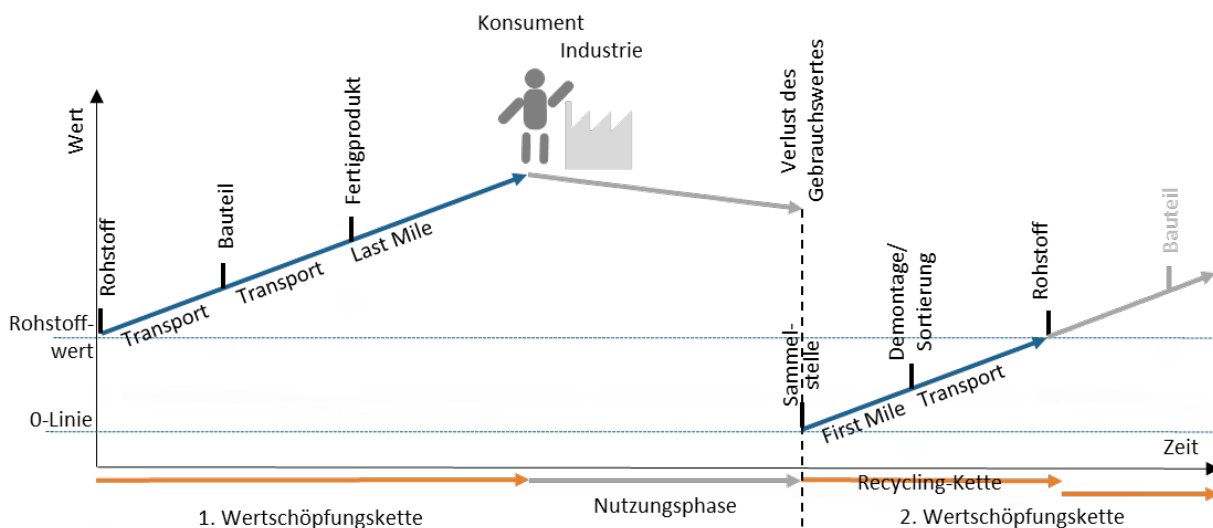
Analog zur Last Mile der Distributionslogistik gilt die First Mile der Entsorgungslogistik als besonders anspruchsvoll. Um Analogieschlüsse zu ermöglichen, wird hier zunächst die Last Mile erläutert. Die Last Mile in der Logistik beschreibt den Transport zur „Haustür“ des Kunden. Dieser wird in Deutschland überwiegend durch KEP Dienstleister (Kurier-, Express-, und Paket-Dienst) abgewickelt. Die Herausforderung bei der Last Mile Logistik sind gestückelte Warensendungen und die Vielzahl möglicher Adressen. Daraus ergeben sich weitverteilte Anlieferpunkte mit kleinen Mengen/Volumina pro Sendung und Anlieferung. Hinzu kommt eine -auf die Einzeladresse bezogen- niedrige Lieferfrequenz. Der Warenwert pro Sendung gilt z.B. im Versandhandel mit ca. 30€ im Durchschnitt als extrem niedrig. Die Zustellungskosten der Last Mile können bei kleinen Warensendungen über 50% der gesamten Transportkosten ausmachen (vgl. u.a. Clausen, Geiger 2013; S. 287). Diese Rahmenbedingungen erschweren

die Realisierung der eingangs genannten Bündelungseffekte. Touren müssen mit dem Ziel der Auslastung von Fahrzeug und Fahrer immer wieder neu geplant werden und richten sich nach dem Sendungsaufkommen im Netzwerk. Je nach Prognosemöglichkeit und -genauigkeit gilt dies als schwer planbar.

Analog dazu ist in der Entsorgungslogistik die First Mile mit großen Herausforderungen verbunden. Für die im Projekt fokussierten edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme beginnt die First Mile im Sinne des hier betrachteten Systems bei Sammelstellen oder etwa auch bei der Demontage. Die Anzahl der Adressen und die Verteilung der Mengen sind nicht so feingranular, dennoch entstehen vergleichbare Herausforderungen zwischen Auslieferungslogistik der Last Mile und Sammellogistik der First Mile, denn die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle fallen ebenfalls oft in geringen Mengen und teilweise an zahlreichen Anfallstellen an (z.B. kann Fahrzeugelektronik aus Altfahrzeugen an bis zu 1250 Altfahrzeug-Demontagebetrieben anfallen). Die Werte der abzuholenden Mengen sind u.a. aufgrund der oft geringen Konzentrationen sehr gering.

Abbildung 6 bringt beide Prozesse in Verbindung. Diese liegen - wie Abbildung 6 verdeutlicht - auch in der Chronologie recht nahe beieinander.

Abbildung 6: Verkettung und Herausforderung von Last Mile der Auslieferung mit First Mile der Sammellogistik; Quelle: Eigene Darstellung



Anm.:

Winkel der Wertsteigerung und Dauer der Phasen sind willkürlich gewählt und dienen nur der Veranschaulichung.

Der Wert nach Gebrauch fällt hinter den Rohstoffwert zurück, da erst Aufwand eingebracht werden muss, um den Rohstoff wieder zu erhalten.

Der Wertverlust unter der Rohstofflinie repräsentiert die Kosten für die Aufbereitung. Die 0-Linie zeigt, wie hoch der Aufwand der Rückgewinnung sein darf, um kostendeckend zu arbeiten. Fällt der Wert unter diese Linie, dann kann der Aufwand der Rückgewinnung durch den reinen Rohstoffpreis nicht zurückgewonnen werden. Der Wert fällt also unter null.

Wertschöpfungskette 1 startet mit dem Rohstoff und erstreckt sich bis zum fertigen Produkt. Nach der Wertschöpfungslogik wird dem Produkt Stufe für Stufe Wert hinzugefügt (vgl. Porter 1986; S. 60ff). Auch Logistik ist hier wertschöpfend, da das Produkt beim Kunden einen höheren Nutzwert hat als im Fertigteillager. Nach der Distribution schließt sich die Nutzungsphase entweder in der Industrie oder beim Verbraucher an. Am Ende der Nutzungsphase verfällt, mit Beginn der Entsorgung, der Ge-

brauchswert. Dieser fällt hinter den reinen Rohstoffwert zurück, da nun erst Kosten anfallen, um an den reinen (Sekundär-)Rohstoff zu gelangen. Mit Beginn der Recycling-Kette startet die zweite Wertschöpfungskette.

Im Schaubild wird eine Problematik deutlich: Während die Last Mile den Rohstoff, verbaut in einem hochwertigen Produkt, aufwendig distribuiert, sammelt die First Mile den Rohstoff in seiner niedrigsten Wertigkeit ein. Die Logistikkosten - anteilig am Produktwert - sind also bei Last Mile eher gering, bei First Mile eher hoch. Dies unterstreicht die eingangs ausgeführte Überlegung, dass in der Recyclinglogistik die Kostenziele deutlich dominieren. D.h. die definierte Logistikleistung der Einsammlung muss so kostengünstig wie möglich erfolgen.

Da die Einsammlung im Sinne dieses Projektes nicht direkt bei den Endkonsumenten, sondern bei Sammelstellen oder etwa dem Demontagebetrieb beginnt, ist die Möglichkeit zur Bündelung gegeben. Damit ist die Bündelung verschiedener Stoffe gemeint, aber auch die zeitliche Bündelung in Form einer Bevorratung bis z.B. ein Behälter maximal ausgelastet ist. Herausforderung ist dann, die Abholung so zu organisieren, dass durch eine Mindestanzahl voller Behälter das Transportmittel voll ausgelastet werden kann.⁵ Bei den im Projekt fokussierten Stoffen kommen an den Anfallstellen z.T. sehr geringe Mengen zusammen. Konsequenz ist, dass es Jahre dauern kann, bis ein Behälter/Transportmittel wirtschaftlich sinnvoll ausgelastet werden kann. Daher ist es ein Ziel, über Abholutouren so zu bündeln, dass eine ausreichende Menge pro Tour zusammen kommt.

Die Nutzung von Behältern bietet die Möglichkeit, dass Handhabungskosten bei Be- und Entladung minimiert werden können. Allerdings müssen Behälter zu Verfügung gestellt werden. Die Gestellung (Bereitstellung) von Behältern stellt einen Transport dar, der zumindest bei der Erstgestellung ohne „natürliche Rückfracht“ erfolgt. In einem laufenden System werden Leerbehälter aufgestellt und Vollbehälter mitgenommen. Die Leerfahrt entfällt damit. Somit ist eine Herausforderung, Erstgestellungen durch eine Unterbrechung der Tauschzyklen zu minimieren.

Wenn Mehrwegbehälter genutzt werden, entsteht ein Behälter-Tauschkreislauf. Dieser kann offen sein, also auch mit anderen Behältersystemen kombinierbar sein (z.B. bei Standard Gitterboxen) oder es kann ein geschlossenes System sein, bei dem nur die eigenen Behälter zirkulieren. Ersteres ist extrem flexibel, birgt aber die Gefahr, dass qualitativ niederwertige Behälter gegen hochwertige Behälter getauscht werden (müssen). Ein geschlossenes System ist weniger flexibel und fehleranfälliger, da nicht gleich Ersatz bereitsteht, wenn ein Behälter fehlt oder abhandenkommt (in offenen Systemen ist dies zwar auch möglich, aber weniger wahrscheinlich). Das Qualitätsproblem im Tauschvollzug kann nahezu ausgeschlossen werden.

Entscheidend für einen effizienten Prozess in der Logistik, aber auch in weiterer Verarbeitung der Abfälle ist die nutzungsadäquate Behandlung der Abfälle in den Sammelstellen, d.h. Verunreinigungen sind zu vermeiden. Dies ist in der Regel in den Sammelstellen bekannt und wird auch berücksichtigt.

Weniger bekannt und berücksichtigt ist, dass auch die korrekte Befüllung von Behältern eine Rolle spielt. Der Vorteil standardisierter Behälter wird ausgehebelt, wenn diese nicht adäquat befüllt werden. Z.B. eine Befüllung über das Maximalmaß hinaus führt zu langwierigen Umschlagsprozessen und hebt evtl. die zeitliche Planung einer Sammeltour aus. Diese logistischen Anforderungen sind in Sammelstellen nicht immer ausreichend bekannt. Hinzu kommt die Vermeidung von Beschädigungen, welche evtl. die Abfälle für eine weitere Verwertung unbrauchbar machen können.

⁵ Bspw. fasst ein Sattelschlepper ca. 30 Paletten. Werden diese 30 Paletten nur halb befüllt, dann ist der LKW zwar mit Paletten vollgeladen, aber seine Kapazität trotzdem nicht voll ausgelastet. Das gleiche Problem findet sich bei allen Situationen, in welchen Behälter ineinander verschachtelt genutzt werden: Die Auslastung der kleinen Einheit ist Vorbedingung der Auslastung der größeren Einheiten.

Ein wichtiger Faktor im Rahmen der Last/First Mile-Logistik sind die Stoppkosten. Diese berechnen sich aus den Kosten für Fahrzeug und Fahrer, geteilt durch die Anzahl der Stopps an erfolgreich angefahrenen Adressen. Dazu zählen Fahrzeiten sowie Warte- und Be-/Entladezeiten. Letztere fließen in die Stoppzeiten. Stoppzeiten limitieren neben den Fahrzeiten die Anzahl der Adressen, die angefahren werden können und erschweren damit die logistische Planung und erhöhen logistische Kosten. Kostentreiber ist dabei alles was die Dauer eines Stopps erhöht.

Dies sind insbesondere

- die Suche nach, oder das Warten auf Ansprechpartner/Adressaten,
- zusätzliche Handhabungsaufwände bei Be-/Entladung,
- schwierige Anfahrt und Ausfahrt auf den letzten Metern (vgl. Schnedlitz et al. 2013; S. 252).

Um effizient arbeiten zu können, müssen also nicht nur Distanzen reduziert werden, um Fahrzeiten zu sparen, sondern auch die Stoppzeiten sind zu reduzieren.

2.2.3.1.2 Zu 1.2 Herausforderungen der Anbindung von Sammelstellen auf informatorischer Ebene

Die informatorische Ebene dient in erster Linie der Steuerung der logistischen Prozesse auf der physischen Ebene. Je genauer und verlässlicher Informationen sind, mit welchen geplant werden kann, desto effizienter können Prozesse auf der physischen Ebene abgewickelt werden. Zusätzlich bergen planerische Freiheitsgrade die Möglichkeit zur Optimierung eines Transportsystems.

Eine Herausforderung bei der First Mile auf informatorischer Ebene ist die Planbarkeit von Mengenaufkommen. Die Prognose anfallender Mengen wird umso genauer, je weiter zurückliegend historische Daten verfügbar sind, die sich auf das gleiche System beziehen. Dies gilt sofern Rahmenbedingungen gleich bleiben oder nur geringfügig geändert werden. Problematisch ist dabei die grundsätzliche Verfügbarkeit von nutzbaren Daten und Änderungen im System (z.B. Veränderung bei Anzahl oder Verortung von Sammelstellen). Für eine proaktive Abholung von Behältern ohne eine Abholungsmeldung (vgl. informatorische Ebene) sind gute Prognosewerte notwendig. Über proaktive Abholung kann z.B. ein Transportmittel ausgelastet werden. Im Falle neuer Abfallströme, wie sie bei der Verwertung der hier betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfälle entstehen, sind meist keinerlei historische Daten verfügbar.

In der Regel werden volle Behälter zur Abholung gemeldet. Die Abwicklung dieser Meldungen birgt eine Reihe von Herausforderungen. Zunächst ist das die medienbruchfreie Kommunikation der Abholungsmeldung. Grundsätzlich sind viele Kommunikationskanäle denkbar, z.B. Telefon, Fax, Email und EDI (Electronic Data Interchange). Je heterogener die Abholungsmeldungen eingehen, desto aufwendiger ist ihre administrative Verarbeitung. Die Meldungen stellen den Auslöser der Abholung dar. Je besser und verlässlicher deren Informationsgehalt hinsichtlich der Befüllung eines Behälters bzw. hinsichtlich der abzuholenden Menge ist, desto effektiver kann die Logistik abgewickelt werden. Wird beispielsweise ein halbvoller Behälter zur Abholung gemeldet, dann führt dies zu einer Unterauslastung des Transportmittels.⁶

Planerische Freiheitsgrade entstehen durch die Reaktionszeit, die auf eine angemeldete Abholung eingeräumt wird. Je enger das Zeitfenster für die Abholung bemessen ist, desto weniger Möglichkeit zur planerischen Optimierung der Abholung (Bündelung mit anderen Abholungen) ist gegeben. Hier liegt ein Konflikt zwischen Gestaltung der Sammelstelle und Organisation von Transporten. Wenn die Sammelstelle unter Flächenmangel arbeitet, dann ist diese interessiert daran, dass nur ein Behälter vor Ort ist und dieser sofort bei Erreichung des maximalen Füllgrades ausgetauscht wird. Organisato-

⁶ Vgl. Fußnote 5.

ren des Abtransportes hingegen benötigen zur verbesserten Planung Freiheitsgrade im Abholzeitraum. Hier gilt: Je größer der Abholzeitraum, desto besser für die effiziente Planung. Eine Herausforderung liegt in der Abwägung dieses Konfliktes.

2.2.3.1.3 Zu 1.3 Herausforderungen der Anbindung von Sammelstellen für finanzielle Motivation bzw. Anreiz

Die Motivation zur Abholung der Abfälle aus Sammelstellen liegt entweder in rechtlichen Vorgaben, wie sie z. B. im ElektroG verankert sind, oder in wirtschaftlicher Attraktivität der Abfälle bzw. der daraus gewonnenen Rohstoffe. Auch eine Mischung beider Anreize ist denkbar, also die Verpflichtung zur Rücknahme, deren anfallende Kosten durch die Verwertung der zurückgenommenen Abfälle kompensiert werden. Der wirtschaftliche Anreiz ist umso höher, je niedrigschwelliger der Zugang zu den werthaltigen Rohstoffen ist (in Logistik und in technischer Aufbereitung). D.h. wenn die eingangs erwähnten Möglichkeiten für eine effiziente Abwicklung (Economies of scale und scope etc.) ermöglicht werden, dann sinkt die wirtschaftliche Barriere für eine Verwertung.

Bei der rechtlichen Verpflichtung zur Rücknahme von Produkten entsteht ein Zwang für Hersteller oder Inverkehrbringer, diese zurück zu nehmen bzw. die Rücknahme zu organisieren und/oder zu finanzieren. Die effiziente Abwicklung der dann entstehenden Rücknahmesysteme wird umso besser, je mehr wirtschaftlicher Anreiz für die Rücknahme ermöglicht wird. Daher ist eine Herausforderung auf der Ebene der Anreize, die rechtlichen Regularien so zu gestalten, dass die Rücknahmesysteme entsprechend der eingangs erwähnten Effizienzsteigerungsansätze gestaltet werden können. Letztlich haben Gesetzgeber und Rücknahmesysteme das Ziel der effizienten Abwicklung einer Recyclinglogistik.

2.2.3.2 Sortierung und Demontage

Sortierung bezeichnet den Prozess der Trennung nach Stoffart. Der entscheidende Prozess im Werkstoffrecycling ist die Sortierung der demontierten Teile nach recyclingfähigen Wertstoffgruppen oder sortenreinen Wertstofftypen (vgl. Marten, Goldmann 2016; S. 44f). Dieser Prozess entspricht dem logistischen Prozess des Umschlags, genauer der Kommissionierung. In der Kommissionierung werden aus Warenbündeln neue Sendungsbündel erstellt, die an einen Adressaten geschickt werden müssen. Es wird also entsprechend des Adressaten sortiert.

Häufig kommen in der Sortierung technische Anlagen zum Einsatz, die den Sortierungsprozess selbst automatisieren. In diesem Falle ist die Sortierung primär eine Herausforderung für Verfahrenstechniker bzw. für Chemiker, Physiker und die technische Unterstützung und Automatisierung von Verfahren durch Ingenieure. Trotz weitreichender Automatisierung bleiben aber einige Sortierungsprozesse manuell. Der Grund ist, dass sich die Prozesse derzeit nicht automatisieren lassen, oder die geringen Mengen eine wirtschaftliche Automatisierung derzeit verhindert. Hier greifen wiederum logistische Ansätze aus der Organisation effizienter Umschlagprozesse, mit dem Ziel die Lohnstückkosten zu reduzieren. Sortierung entspricht logistisch der Umgruppierung und Bündelung. Aus eingehenden Materialströmen werden neue, nach stofflichen Inhalten gebündelte Materialströme. Gebündelt wird beispielsweise nach Materialbeschaffenheit oder Objektbeschaffenheit.

Die Demontage ist die manuelle oder mechanische Zerlegung eines Objektes in einzelne Module und/oder Werkstoffgruppen. Insbesondere stehen dabei vier Ziele im Vordergrund:

- Gewinnung von Funktionsbauteilen (Getriebe, elektrische Bauteile etc.),
- Schadstoffentfrachtung (Batterien, Öle etc.),
- Gewinnung von recyclingfähigen Werkstoffen (Stahl, Kunststoffe etc.) und
- Minimierung des Restabfalls.

Das Demontageergebnis wird dabei vor allem durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Art der Verbindungstechnik,
- die räumliche Anordnung und Zugänglichkeit und
- Identifizierbarkeit der Werkstoffe (vgl. Martens, Goldmann 2016; S. 29ff).

Ebenso wie im Bereich der Sortierung ist die Demontage dann auch eine logistische Herausforderung, wenn diese manuell vollzogen wird. Logistisch entspricht die Demontage einer Entbündelung: Ein Objekt stellt den Input des Prozesses dar und mehrere Objekte sind Ergebnis des Prozesses.

2.2.3.2.1 Zu 2.1 Herausforderungen in Sortierung und Demontage auf physischer Ebene

Herausforderung auf physischer Ebene der Sortierung und Demontage aus logistischer Sicht ist zunächst die Identifizierung einer optimalen Positionierung von Sortierungs- und Demontageschritten in der Prozesskette. Ist es sinnvoll, diese Prozessschritte in räumlicher Nähe zu Sammelstellen oder in räumlicher Nähe zur Aufbereitung anzusiedeln? Ergeben sich bei den Sammelstellen Bündelungseffekte können die Prozesse hier durchgeführt werden. Wird bei der Aufbereitung gebündelt, sollten eher dort die Prozesse stattfinden. Es gilt grundsätzlich: Je aufwendiger die Demontage bzw. Sortierung ist, desto mehr muss gebündelt werden. Dies liegt im eingangs erläuterten Skaleneffekt begründet (vgl. Welge et al. 2017; S. 312 und S. 528).

In der Recyclinglogistik würde eine frühe Trennung (z.B. von Bauteilen/Komponenten) und eine frühe Zusammenführung von gleichen Wertstoffen aus unterschiedlichen Quellen zu höherer Spezialisierung und Bündelungen in den nachgelagerten Schritten führen. Somit kämen Kostenvorteile durch die eingangs erläuterten Effekte der „Economies of scale“, der „Economies of scope“ und der Verdichtungseffekt zum Tragen. Allerdings ist die Zusammenführung nur dann sinnvoll, wenn so sortiert wurde, dass die nachgelagerten Prozessschritte gleich sind. Herausforderung ist also die Sortierung an den Prozessanforderungen der folgenden Prozessschritte zu orientieren.

Es stellt sich die Frage wie kostengünstig Bündelung (Sortierung) und Entbündelung (Demontage) realisiert werden können. Im internationalen Schiffsverkehr werden beispielsweise Packstücke in Containern gebündelt, Container auf einem Schiff gebündelt und im Zielhafen entbündelt, damit sie in verschiedene Regionen transportiert werden können. Dort werden wiederum die Packstücke entbündelt und zugestellt. Bündelung und Entbündelung beziehen sich auf Transporthilfsmittel und Packstücke. Im Gegensatz dazu, bezieht sich die Entbündelung in der Entsorgung auf ein bestimmtes Produkt (z.B. Abtrennung von NdFeB-Magneten aus Motoren). Eine Herausforderung für die Sortierung und Demontage ist zunächst, die technische Machbarkeit von Demontage und Sortierung festzustellen. Teilweise sind vor der Separation des Ziel-Bauteils „störende“ Bauteile zu entfernen. Zielsetzung ist dann, so zu bündeln, dass ein hoher Standardisierungsgrad bei den nachfolgenden Prozessschritten ermöglicht wird. Darauf folgt dementsprechend die Herausforderung, diesen Prozess möglichst effizient in relevanten Mengen entweder durch Automatisierung oder manuelle Prozesse durchzuführen (vgl. Walther 2010; S. 190f). Automatisierung ist primär eine technische Fragestellung und nicht im Fokus logistischer Überlegungen im Projekt. Die Abwicklung manueller Prozesse der Sortierung und Demontage zielt jedoch auf logistische Kernaktivitäten ab. Herausforderung ist es, eine kürzere bzw. steilere Lernkurve zu etablieren.⁷ Dies basiert jedoch auf der Organisation der Prozesse in einer Form, dass möglichst hohe Stückzahlen pro Mitarbeiterstunde in Sortierung und Demontage erzielt werden. Damit ist also die Optimierung der Lohnstückkosten im Fokus der Betrachtung. Dies ist bei den hier

⁷ Eine Lernkurve oder Erfahrungskurve bezeichnet das Phänomen, dass Aktivitäten, die mehrfach wiederholt werden, immer effizienter durchgeführt werden. Je steiler die Lernkurve ist, desto schneller tritt dieser Lerneffekt ein. Die Lernkurve erreicht allerdings in den meisten Fällen ein Maximum/Optimum, das nur durch Nutzung neuer Technologien etc. verbessert werden kann. Vgl. dazu auch 2.2.4.2.3

betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfällen aufgrund der meist geringen Durchsätze je Betrieb besonders problematisch.

Für logistische Aufwände hat Sortierung eine wesentliche Bedeutung: Eine frühe Sortierung der Materialien führt zu sortenreinen Transporten. Tendenziell steigt dadurch die Wertdichte der transportierten Materialien. Der Nettowert der transportierten Menge ist höher und die umgebende Tara sinkt. Damit wird die logistische Leistung effizienter genutzt.

2.2.3.2.2 Zu 2.2 Herausforderungen in Sortierung und Demontage auf informatorischer Ebene

Wie zu Beginn erläutert, sind die Erkennbarkeit der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile, deren räumliche Anordnung und Zugänglichkeit sowie die Identifizierbarkeit der Wertstoffe wesentlich für das Ergebnis der Demontage. Dies sind die Herausforderungen für die informatorischen Ebenen. Informationen zur Zusammensetzung der Objekte (insbesondere Gehalt an Edel- und Sondermetallen und ggf. weiterer Wert-, Schad- und Störstoffe) sowie der Verortung und Identifizierung von Wertstoffen in den Objekten machen die Demontage erst möglich oder deutlich effizienter. Vorhandene Informationen dazu sind nur schwer zugänglich und nicht an der Demontage der Objekte orientiert. Informationen der Hersteller sind hilfreich, tragen aber nicht immer auch die Informationen zu verbauten Vorprodukten und deren Baugruppen. Je nach Art der Separation, manuell oder automatisiert, kann der Informationsbedarf bzw. die Art, in der die Information benötigt wird, unterschiedlich ausfallen.

Zudem entspricht ein Bauplan eines Produktes noch keiner Demontageanleitung. Die Überführung verfügbarer Informationen und Dokumentationen in notwendige Anleitungen ist ein wesentlicher Schritt und z. T. gesetzlich bereits verankert, vgl. zum Beispiel in § 9 Altfahrzeug-Verordnung. Die entsprechenden Regelungen beziehen sich jedoch derzeit nicht auf die hier betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Bauteile. Wenn diese Anleitung verfügbar ist, dann entsprechen die Bereitstellung dieser Anleitung und die Einhaltung bei der Umsetzung der logistischen Herausforderung.

Logistische Herausforderung ist dann, diese Informationen an den Orten der Demontageprozesse verfügbar, zugänglich und effizient nutzbar zu machen.

Aus heutiger Sicht muss mit Produkten gearbeitet werden, die vor längerer Zeit (z.B. 18 Jahren am Beispiel der Automobilelektronik (Statista 2017)) verkauft wurden. Die damals herrschenden Rahmenbedingungen und technischen Möglichkeiten der Informationsbereitstellung durch Hersteller müssen dabei berücksichtigt werden. Dies bedeutet aber auch, dass heute entwickelte Lösungen, die z.B. in Fahrzeugen verbaut werden, erst in durchschnittlich 18 Jahren im Recycling-Prozess genutzt werden können.

2.2.3.2.3 Zu 2.3 Herausforderungen in Sortierung und Demontage für finanzielle Motivation bzw. Anreize

Manuelle Demontageprozesse sind sehr aufwendig. Kostentreiber sind die hohen Lohnstückkosten⁸, wenn Prozesseffizienz nicht zu einem erhöhten Output an demontierten Produkten oder sortierten Wertstoffen führt. Heute werden für die meisten der betrachteten Stoffströme kaum Demontageprozesse durchgeführt, aber aufgrund der meist mangelhaften Verfügbarkeit von Informationen zu Verbauart und Verbauort bestimmter Wertstoffe in den Abfallobjekten muss zunächst von ineffizienten Prozessen ausgegangen werden. Allerdings ist auch mit einer Lernkurve und sukzessive besserer Information zur Demontage zu rechnen. Um einen wirtschaftlichen Anreiz zu bieten, ist eine strukturierte Vorgehensweise bei der Etablierung eines Lerneffektes notwendig, nur so kann dauerhaft schnell und effizient gearbeitet werden. Vergleichbares gilt bei der Zusammenstellung und Aufbereitung von Informationen. Eine gezielte Vorgehensweise kann zu schnelleren Effizienzverbesserungen führen.

⁸ In der betrachteten Branche kostete eine Arbeitsstunde im Jahr 2012 28,10€; vgl. Statistisches Bundesamt 2015

2.2.3.3 Rückgewinnung („Produktion“)

Ist der Wertstoff beim Verwerter angekommen, müssen die Zielmaterialien aus dem gewünschten Objekt in marktgängiger Form zurückgewonnen werden. Diese Verfahren sind oft komplexe mechanische und/oder chemische Prozesse unter Nutzung investitionsintensiver Anlagen. Je nach vorgelagerter Prozesskette und Bündelungseffekten, findet noch eine Sortierung oder Demontage statt (vgl. Walther 2010; S. 213).

Die Produktion steht nicht im Fokus der Betrachtung logistischer Prozesse. Sie wird am Rande berücksichtigt, da einerseits intralogistische Prozesse eine Rolle spielen und andererseits im Umfeld der Produktion in der Regel Lagerhaltung stattfindet.

Bei der Aufbereitung von Wertstoffen entstehen oftmals Kuppelprodukte, die ihrerseits entsorgt oder verwertet werden müssen. Für diese sind logistische Herausforderungen auf allen Ebenen zu berücksichtigen.

2.2.3.3.1 Zu 3.1 Herausforderungen in der Rückgewinnung auf physischer Ebene

In großen Anlagen laufen intralogistische Prozesse meist vollautomatisch ab. Ohne genaue Kenntnisse der Anlagen lassen sich intralogistische Prozesse und Herausforderungen schwer darstellen. Grundsätzlich gelten ebenfalls die eingangs beschriebenen Effekte der Effizienzsteigerung.

Insbesondere wenn in einer Anlage unterschiedliche Produkt-/Abfallgruppen verarbeitet werden können, ist Lagerung in räumlicher Nähe zur Anlage nötig. Dabei wird das Lager an den Produktionslosen der Anlage dimensioniert, d.h. es wird bis zu einem vollen Produktionslos gelagert, um nach Umrüstung der Anlage ein volles Produktionslos produzieren zu können. Es sollten also Vielfache der Produktionslose gelagert werden, um die Anlage bei optimierten Rüstzeiten möglichst effizient auslasten zu können. In Abhängigkeit von der Durchlaufzeit eines Produktionsloses sind das Lager und dessen Befüllung zu organisieren. Die Dauer einer Produktion (Durchlaufzeit des Produktionsloses) gibt die Zeit vor, die zur Verfügung steht, um ein weiteres Produktionslos bereitzustellen bzw. einzulagern.

Je nach Dauer der Durchlaufzeit kann sich Lagerzeit ergeben, die Schutzmaßnahmen gegen qualitativen Verfall der Wertstoffe notwendig macht. Materialien müssen ggf. vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit oder Verschmutzung geschützt werden. Die gesetzlich erforderlichen Gestattungen für die Lagerung müssen beantragt und deren Bestimmungen, z. B. zur maximalen Lagermenge, eingehalten werden. Solche Maßnahmen treiben den Aufwand der Lagerhaltung.

Wenn Wertstoffe in Behältern eingelagert werden, ist die Lagerdauer bezüglich der Verfügbarkeit der Behälter relevant. Die Einlagerung der Behälter reduziert deren Umschlaggeschwindigkeit und macht eine höhere Anzahl von Behältern notwendig, um das Austauschsystem aufrecht zu erhalten. In einem offenen Tauschsystem ist dies im Grunde unproblematisch, da Behälter i.d.R. ausreichend verfügbar sind. In einem geschlossenen System sind mehr Behälter notwendig. Diese sind für das System zu beschaffen, was die Kosten des Gesamtsystems treibt.

Für Nebenprodukte der Rückgewinnung entstehen logistische Aufwände in Lagerung und Abtransport. Die Kostentreiber an dieser Stelle sind insbesondere die Mengen der Nebenprodukte sowie die Planbarkeit der Mengen in Abhängigkeit von verarbeitetem Wertstoff.

2.2.3.3.2 Zu 3.2 Herausforderungen in der Rückgewinnung auf informatorischer Ebene

In die Anlagensteuerung sind auch Steuerungsinformationen für die Intralogistik integriert. Diese sollen hier nicht weiter betrachtet werden und sind in der Regel auch Teil des technischen Setups der Anlage.

Eine Herausforderung an die Logistik entsteht nach der Aufbereitung der Rohstoffe, Ende der Abfalleigenschaft und mit Entstehung der (Neben-)Produkte. Hier setzt die klassische Distributionslogistik an,

die die Aufgabe der Verteilung von Produkten hat. Da der Recycling-Prozess hier abgeschlossen ist, steht dies nicht mehr im Projektfokus. Dennoch sei hier erwähnt, dass Zielmärkte und Zielkunden und damit Lieferdestinationen zu definieren sind, um die entstandenen Produkte zu vertreiben. Zeitlich gesehen stellt sich die Frage nach den Kunden meist vor dem eigentlichen Produktionsprozess und kann durchaus noch als Aufgabe im Recyclingprozess interpretiert werden. Es müssen Nachfragemengen identifiziert werden und die damit zusammenhängenden logistischen Destinationen ermittelt werden. Lieferkonditionen sind auszuhandeln. Daraus ergibt sich ein Allokationsproblem, welche Mengen aus welcher Produktionseinrichtung zu welchem Kunden geliefert werden. Diese Fragestellungen bergen planerische Aufwände, die zu minimieren sind bzw. die mit den möglichen zusätzlichen Erlösen abzuwägen sind. Es muss also geklärt werden, ob es lohnenswert ist, immer wieder neue Produkte zu vertreiben und auch die Distribution immer wieder neu zu planen, oder ob eine dauerhafte Beziehung zu einem Kunden auch bei möglichen Erlöseinbußen sinnvoll ist.

2.2.3.3 Zu 3.3 Herausforderungen in der Rückgewinnung für finanzielle Motivation bzw. Anreiz

Eine Frage auf der finanziellen Ebene und bezüglich der Anreize wurde bereits mit der Distributionslogistik angerissen. Die Zuordnung von Angebotsmengen zu Märkten kann einen Anreiz bieten, aufwendige Logistik zu betreiben, um immer wieder die aktuell attraktivsten Märkte zu bedienen. Die ist allerdings aufgrund der immer neuen Planungsprozesse nur dann sinnvoll, wenn die Unterschiede in den Erlösen dies auch rechtfertigen.

Logistische Aufwände, die durch die Entsorgung oder Verwertung von Nebenprodukten entstehen, müssen bei der Bewertung der gesamten Prozesskette mit berücksichtigt werden. Auch hier gilt, wie beim Zielrohstoff, dass logistische Prozesse Kostentreiber sind. Die hier entstehenden Kosten sind möglichst niedrig zu halten. Durch die Verwertung der Produkte können diese Kosten kompensiert werden oder die Kosten sind durch die Erlöse aus der Vermarktung der Zielrohstoffe mit zu tragen. Wenn Nebenprodukte aufwendig zu entsorgen oder schwer zu vertreiben sind, stellen diese einen explizit negativen Anreiz für den Betrieb der gesamten Prozesskette dar.

2.2.3.4 Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion

Quer über alle bisher betrachteten Stufen der Recyclingkette liegen Herausforderungen, welche die Logistik als Querschnittsfunktion begreifen und einen systemischen Ansatz der Prozesskette verfolgen. Recyclingsysteme, die für die Verwertung z.B. von Leuchtmitteln, Sicherungen oder Bauschaumdosen eingerichtet wurden, agieren als Koordinatoren einer logistischen Prozesskette.

Herausforderungen für die Koordination im Querschnitt, also auch über die Schnittstellen hinweg, ist die Aushandlung von Bedingungen an den Schnittstellen. Hier werden Regeln vereinbart, welche Teile der oder alle „7 Rights“ mit konkreten Anforderungen füllen, also ausdefinieren was z.B. als richtige Lieferzeit akzeptiert wird.

Sofern die Vorbedingungen dies zulassen ist auch die Planung des Netzwerkes an sich Teil der Koordinationsaufgabe. Typische Herausforderungen sind:

- Dimensionierung und Definition von Sammelgebieten,
- Auswahl und Zuordnung von Anlagen zur Demontage und Sortierung und
- Auswahl und Zuordnung von Anlagen zur Verwertung.

Hier wird deutlich, dass letztlich die Gestaltung des Knoten-Kantenmodells, also des Netzwerkes, in dem die Prozesskette durchlaufen wird, eine Hauptaufgabe ist.

Weitere Aufgabe ist die Organisation der Arbeitsteiligkeit entlang der Prozesskette. Hier stellt sich auch die „Make or Buy“-Frage als klassische betriebswirtschaftliche Entscheidung. Also die Frage, ob

und welche Teile der Prozesskette selbst geleistet werden bzw. ob und welche Teile fremdvergeben werden.

Die Koordination der Arbeitsteilung erfolgt dann über Steuerungsinformationen auf informatorischer Ebene. D.h. Kernaufgabe der koordinierenden Stelle ist das Management der Informationsflüsse. Hier gilt: je besser und aktueller Informationen sind und je leichter diese verarbeitet werden können, desto effizienter kann die Arbeitsteiligkeit in der Prozesskette organisiert werden. Hier greifen die Effizienzversprechen der Digitalisierung von Produktionsprozessen bzw. von Industrie 4.0 und Big Data Management.

Auf monetärer Ebene stellt sich die Frage nach der Finanzierung des Unternehmens, das die Koordinationsaufgabe übernimmt. Dieses Unternehmen kann gewinnorientiert arbeiten, kostendeckend als Non-Profit-Organisation arbeiten oder durch Hersteller getragen werden, die wiederum gesetzlich zur Rücknahme von Produkten verpflichtet worden sind.

2.2.4 Ein generisches Modell logistischer Lösungsansätze in der Recycling-Kette

Im Folgenden werden nun Ansätze dargestellt, die die aufgezeigten Herausforderungen in der Recycling-Kette lösen können. Dabei wird auf bereits erprobte Verfahren benachbarter und verwandter Recycling-Ketten zurückgegriffen oder auf Lösungen, die aus anderen Anwendungsfeldern der Logistik bekannt sind und als erfolgsversprechend übertragbar gesehen werden.

Tabelle 27 orientiert sich an der Logik von Tabelle 25. Für die in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Herausforderungen werden hier zunächst Lösungsansätze tabellarisch auf Stufen und Ebenen zugeordnet und im Weiteren detaillierter beschrieben.

Tabelle 27: Lösungsansätze entlang einer generischen Recycling-Kette

	1. Sammelstelle	2. Sortierung und Demontage	3. Aufbereitung
Physische Ebene	<p>1.1</p> <p>Tourenplanung für zeitliche (und stoffliche) Bündelung sowie Mengenbündelung</p> <p>Prozessuale Verkürzung der Stoppzeiten</p>	<p>2.1</p> <p>Netzwerkplanung zur Definition von Sammelgebieten sowie zur Positionierung von Sortierung und Demontage</p> <p>Lean Management Instrumente zur Optimierung manueller Prozesse</p>	<p>3.1</p> <p>Behältermanagement (Distributionslogistik)</p>
	<p>1.2</p> <p>Automatisierung bzw. Teilautomatisierung der Füllstandmeldung</p> <p>Planbarkeit der Mengen</p> <p>Freiheitsgrade für Planungsprozesse</p> <p>Digitale Spotmarkt Plattform für Abholung</p> <p>Anmeldung zur Reduzierung der Stoppkosten</p>	<p>2.2</p> <p>Auto-ID System zur Identifikation von Wertstoffen in Bauteilen</p> <p>Offene Informationsplattformen für Informationen zur Zugänglichkeit der Bauteile</p> <p>Bereitstellung von geprüften Demontageanleitungen auf (offenen) Plattformen</p>	<p>3.2</p> <p>Spotmarkets vs. Kooperationen</p>
Finanzielle Ebene/ Motivation/Anreiz	<p>1.3</p> <p>Vergabe zu Marktpreisen an Logistikdienstleister</p>	<p>2.3</p> <p>Gezielte Nutzung der Erfahrungskurve</p>	<p>3.3</p> <p>(Spotmarkets vs. Kooperationen)</p>
4. Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion			

2.2.4.1 Sammelstelle

2.2.4.1.1 Zu 1.1 Lösungsansätze zur Anbindung der Sammelstellen auf physischer Ebene

Bereits gängiger Ansatz zur zeitlichen und stofflichen⁹ Bündelung anfallender Mengen und der effizienten Abwicklung von Ausliefer- oder auch Sammelprozessen (sowie deren Kombination) ist die Tourenplanung. Die Tourenplanung geht von Sendungs- oder Abholinformationen aus, also Adressen und den dorthin zu liefernden Mengen und/oder der dort abzuholenden Transportintensität. Grundsätzliches Ziel der Tourenplanung ist, die Adressen unter möglichst geringem Aufwand anzusteuern und Sendungen dort hin zu bringen und/oder Sendungen dort einzusammeln. Es wird in der Tourenplanung zwischen Knoten- und Kantenplanung unterschieden. Knotenplanung ist die Ansteuerung einzelner Adressen. Kantenplanung beschäftigt sich dagegen mit ganzen Straßen. Letztere wird z.B. bei der Leerung von Abfallbehältern entlang ganzer Straßenzüge angewandt. Für die fokussierten Stoffströme, insbesondere bei der Einsammlung von Wertstoffen an Sammelstellen, ist die Knotenplanung relevant. Dabei werden zunächst Touren gebildet und dann streckenoptimale Routen bestimmt. Restriktionen sind typischerweise:

- Anzahl und räumliche Verteilung der Anfallstellen eines bestimmten Abfalls,
- Häufigkeit des Anfalls voller Behälter pro Anfallstelle,
- Verfügbare Infrastruktur (insb. Verkehrswege, Flächen und Immobilien),
- Kapazität der Transportmittel,
- Anzahl verfügbarer Fahrer und Transportmittel,
- Lenkzeiten/Arbeitszeiten der Fahrer,
- Lieferzeit/Abholzeitfenster bei den Adressen,
- Depotkapazitäten am Start-/Zielpunkt der Touren und
- Anzahl und Verfügbarkeit von Behältern.

Fraglich ist die Optimierungsrichtung. Diese kann z.B. sein, alle Adressaten in einem bestimmten Zeitraum anzufahren (Termintreue). Es kann aber auch Ziel sein, die Fahrzeuge und Fahrer optimal auszulasten (Kostenoptimierung).

Je nachdem wie hoch die Anzahl der Adressen ist und wie diese räumlich verteilt sind, ist die Tourenplanung eine extrem komplexe mathematische Aufgabe. Diese kann umso effizienter gelöst werden, je geringer die Restriktionen sind, die vorgegeben werden. Daher ist in Kapitel 2.2.3 die Schaffung von Freiheitsgraden als Herausforderungen genannt. Besonders kritisch sind zeitliche Restriktionen bei der Abholung. Diese entstehen durch Zeitfenster für die Abholung von Wertstoffen. Je enger diese dimensioniert sind, desto aufwendiger wird der logistische Prozess. Wenn lange Abholungszeitfenster angeboten werden sollen, muss Lagerkapazität in den Sammelstellen eingerichtet und ggf. behördlich genehmigt werden, da während der Zeit bis zur Abholung auch Wertstoffe an den Sammelstellen auflaufen. Eine Lösung wäre, nicht mit Abholmeldungen zu arbeiten, sondern regelmäßig Füllstände zu kommunizieren. Diese Informationen könnten in der Tourenplanung verarbeitet werden. So könnten z.B. zu 80% befüllte Behälter zu einem günstigen früheren Zeitpunkt abgeholt werden, statt auf die Erreichung des maximalen Füllstandes zu warten. Die regelmäßige Meldung von Füllständen als Alternative zu Abholmeldungen führt zu höheren Kommunikationsaufwänden und sollte deshalb ent-

⁹ Stoffliche Bündelung ist insofern möglich als verschiedene Wertstoffe durch eine Tour zusammengeführt werden können. Ob dies in Bezug auf die nachgelagerten Bearbeitungsschritte technisch sinnvoll ist, wird hier nicht weiter berücksichtigt.

weder durch optimale Prozesse unterstützt oder automatisiert werden. In jedem Falle sind Medienbrüche zu vermeiden, um Aufwand bei der administrativen Verarbeitung der Meldungen zu reduzieren. Hier ist eine Optimierung in engem Zusammenspiel mit der informatorischen Ebene nötig.¹⁰

Die Stoppkosten können durch einfache prozessuale Regeln deutlich reduziert werden. Eine einfache und bereits weit verbreitete Lösung ist die Nutzung von Behältern. Die Verladung von Behältern ist deutlich schneller als die Verladung von Einzelprodukten. Da dies aber bereits weit verbreiteter Stand der Technik ist, wird diese Lösung nicht weiter erläutert. Die Reduzierung von Such- und Wartezeiten bei der Anmeldung und Abmeldung kann ebenfalls durch Lösungen auf der informatorischen Ebene erreicht werden. Auch hier sind automatisierte Prozesse denkbar, die Stoppzeiten reduzieren können und so eine effizientere Abwicklung ermöglichen.¹¹ Zur Reduzierung von Aufwänden bei der An-/Ausfahrt auf den letzten Metern ist eine prozessuale Abstimmung mit dem Personal der Sammelstelle nötig. Dabei ist besonders wichtig, die Bedeutung von Zeitverlusten klar zu machen. Oftmals ist nicht bewusst wie sich Zeitverluste auf die gesamte Tour auswirken. Nach kooperativer Abstimmung der Prozesse können diese in Regelwerken vereinbart werden und Teil der Koordination der Arbeitsabläufe werden. Gleiches gilt für zusätzliche Handhabungszeiten z.B. bei unsachgemäßer Befüllung von Behältern. Hier können Ansätze des Lean Managements eingesetzt werden wie insbesondere Poka Yoke und/oder Visual Management.¹²

2.2.4.1.2 Zu 1.2 Lösungsansätze zur Anbindung der Sammelstellen auf informatorischer Ebene

Prognosen über den Anfall der fokussierten Abfälle lassen sich heute bereits grob und zukünftig aufgrund einer besseren Datenlage aus Abverkaufdaten in Kombination mit Produktionsformation und Verbrauchsverhalten (Gebrauchsdauer und Entsorgungspräferenzen) erstellen. Dazu ist eine digitale Erfassung und Kombination der Daten im Sinne eines Big Data Management denkbar. Die heutigen Datenbasen und Analyseverfahren reichen für eine feingranulare Steuerung basierend auf so generierten Prognosen nicht aus. Dies könnte sich zukünftig ändern, setzt aber eine Datenerfassung vor Abverkauf (bezogen auf stoffliche Inhalte), bei Abverkauf (verkaufte Mengen und räumliche Verteilung der Produkte) und zur Produktnutzung (Zeit bis zur Entsorgung) voraus. Diese Erfassungspunkte und Erfassungszeiten liegen außerhalb des Projektfokus. Schlüssel für diese Auswertungen ist die Information der Hersteller über die stofflichen Inhalte ihrer Produkte. Diese Information ist notwendig, um im Sinne eines Big Data Managements weitere, z.B. die bereits genannten Informationsquellen zu kombinieren und für ein verbessertes Recycling zu nutzen. Diese Informationen liegen heute bereits in Form von Bauplänen und Stücklisten vor. Da diese aber auch Geschäftsgeheimnisse enthalten¹³, ist eine Offenlegung kritisch. Denkbar wären die Hinterlegung dieser Informationen bei einer neutralen Stelle und die Verfügbarmachung nach einem gewissen Zeitraum. Bei der Speicherung muss auf die Sicherheit der Daten geachtet werden und bei der Dimensionierung des Zeitraums die Wahrung der Wettbewerbsvorteile, die durch enthaltene Informationen gesichert werden. Eine so generierte Datenbasis könnte aber sehr vielversprechende Ansätze zur Optimierung des Systems liefern. Mögliche Nutzer wären Sammelstellen für Kapazitätsplanungen und/oder die unter 4. beschriebenen Systembetreiber.

Für eine Automatisierung von Füllstandmeldungen kommt die Nutzung von Sensorik in Frage. Mittels Sensorknoten kann unterschiedliche Sensorik auch dezentral z.B. in/an Behältern zum Einsatz kommen.¹⁴ Sensorknoten sind Kleinstcomputer etwa in Größe einer halben Zigarettenschachtel. In der

¹⁰ Vgl. unten „1.2 Lösungsansätze für die Einbindung der Sammelstellen auf informatorischer Ebene“.

¹¹ Vgl. unten „1.2 Lösungsansätze für die Einbindung der Sammelstellen auf informatorischer Ebene“..

¹² Vgl. unten „2.1 Lösungsansätze für Sortierung und Demontage auf physischer Ebene“.

¹³ Die Einsicht in Baupläne erleichtert den Nachbau und damit die Kopie eines Produktes und untergräbt damit den Wettbewerbsvorteil von Technologieführern. Insbesondere für deutsche Technologieunternehmen wäre dies problematisch.

¹⁴ Zu Sensorknoten vgl. auch Anhang 1 und Anhang 2.

Regel tragen Sensorknoten eine eigene Energiequelle, können sich aber auch aus Energie speisen, die aus der Umwelt gewonnen wird. Sensorknoten verfügen über Rechenleistung und können per Funkverbindung miteinander und mit übergeordneten Systemen kommunizieren. Sie können unterschiedliche Sensoren tragen. Diese können über Licht- oder Drucksensoren¹⁵ Füllstände von Behältern ableiten und per Funkschnittstelle in ein übergeordnetes System melden. Bei diesem Lösungsansatz sind weitere Kosten zu berücksichtigen:

- Investitionskosten für Infrastruktur zur Anbindung der Sensorknoten (Ausstattung der Sammelstellen mit WLAN, Rechnern und Onlineanschluss),
- Investitionskosten für Sensorknoten und Sensorik,
- Entwicklungskosten für ein übergeordnetes System und Schnittstellen zu Planungstools und
- laufende Kosten für den Prozess der Sensorknoten-Handhabung (Montage und Demontage in Behältern, Prüfung von Batteriebefüllung, Batterietausch).

Diese Kosten sind nur zu rechtfertigen, wenn in akzeptabler Amortisationszeit die Ersparnisse die Kosten aufwiegen. Aus heutiger Sicht scheint diese Lösung möglich, aber wirtschaftlich eher nicht sinnvoll. Dies kann sich ändern, insbesondere wenn laufende Kosten der Batterieverwaltung reduziert werden können, z.B. wenn Sensorknoten ausreichend Energie aus der Umwelt gewinnen. Solche Systeme sind heute verfügbar, aber in der Anschaffung sicher zu teuer für diese Art der Nutzung.

Eine einfachere Lösung ist eine Teilautomatisierung durch die Einrichtung eines Onlineportals in Kombination mit einer mobilen Applikation. Diese könnte mit einem QR-Code kombiniert werden, der die Adresse der Sammelstelle beinhaltet und lediglich abgescannt werden muss, um alle notwendigen Daten zu erfassen. Ein weiterer Scan eines Barcodes kann den Füllstand erfassen. Dazu kann beispielsweise je ein Barcode die Füllstände <50%, 50%, 75%, 100% repräsentieren. Um die Meldung regelmäßig zu bekommen, kann eine automatische Erinnerung angestoßen werden. Dadurch werden manuelle Prozesse minimiert und gut verwertbare Informationen zu Füllständen von Behältern geliefert.¹⁶

Sowohl durch Automatisierung als auch durch Teilautomatisierung der Füllstandmeldung bzw. der Abholungsmeldung entstehen über die Zeit digitale Informationen zu angefallenen Wertstoffmengen. Diese Daten stellen eine optimale Grundlage für Prognosen zukünftig anfallender Wertstoffmengen dar. Kombiniert mit aktuellen Füllstandmeldungen bietet dies die Basis für eine optimierte Tourenplanung. Abholzeitpunkte können vorausgeplant und zur Reduzierung der Stoppkosten angemeldet werden.

Die erläuterten Lösungsansätze erfordern ein Umdenken in der Planungshoheit: Heute müssen Logistiker die Abholung nach Anmeldung durch die Sammelstellen planen. Die oben erläuterten Ansätze ermöglichen den Logistikern eine selbständige Planung in weiten Planungsspielräumen. In industrieller Logistik entspricht dieses Umdenken dem Wechsel von einem Push-System auf ein Pull-System, d.h. von einer Steuerungslogik in der die vorgelagerte Stufe ihren Output in die Kette drückt (push) auf eine Steuerungslogik in der die nachgelagerte Stufe entsprechend ihrer Kapazitäten den nötigen Input aus der Kette zieht (pull) (vgl. Gudehus 2010; S. 287ff). Wenn dabei mit Füllständen gearbeitet wird, fallen in den Sammelstellen keine zusätzlichen Aufwände z.B. durch erhöhte Lagerhaltung an. Um ne-

¹⁵ Bei Lichtsensorik über die Verdunkelung des Sensorbereichs und die daraus abgeleitete Füllmenge, bei Drucksensorik über das Gewicht der eingefüllten Menge.

¹⁶ Eine im Ansatz vergleichbare Lösung bietet z.B. die Osterried Erdbewegungen und Containerservice GmbH in Kooperation mit der CMA-Soft GmbH. Aktuell werden hier nur Containerabholungen angestoßen, allerdings basiert dies auch auf dem Scannen eines QR-Codes und der Anbindung an ein übergeordnetes, internetbasiertes Container-Management-Tool. Vgl. Osterried 2017 und CMA-Soft 2017

gative Auswirkungen zu vermeiden, sollten nach Erreichen des maximalen Füllstandes ein Mindestzeitraum für die Abholung eingeräumt, aber nicht überschritten werden. Dies ist heute z.B. bei der Abholung von Leuchtmitteln bereits der Fall. Neu wäre die Meldung von Füllständen, welche die Planbarkeit im System deutlich erhöht und der Tourenplanung Freiheitsgrade zur Optimierung gibt.

Die digitale Meldung von Füllständen und Abholungsbenachrichtigungen wäre auch Basis komplett neuer Spotmarkt Konzepte für die Vergabe logistischer Dienstleistungsaufträge. Das Unternehmen wastebox.biz bietet eine entsprechende Lösung an, bei der Abholaufträge an Logistik-Unternehmen vergeben werden, die aktuell Fahrzeuge im näheren Umfeld haben und kurzfristig zur Abholung kommen können (vgl. Wastebox 2017). So werden Anfahrtswege gespart und Aufträge kostengünstig abgewickelt. Diese Lösung ist nicht ohne Weiteres auf die fokussierten edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme zu übertragen, da sie ihre Wirkung dadurch entfaltet, dass zufällig auftretende Quellen mit Standard-Senken verbunden werden. Im fokussierten Abfallstrom bleiben die Quellen dauerhaft an fixen Orten, den Sammelstellen. Hier ist die Organisation von Touren logistisch gesehen sicher die effizienteste Lösung. Hintergrund ist der eingangs erwähnte Skaleneffekt und Dichtevorteil bei der Kombination mehrere Abholungen. Allerdings „kippt“ diese Einschätzung für Gebiete, in welchen Abholmeldungen nur sehr selten vorkommen und die Anfahrt über eine Tour nicht effizient kombiniert werden kann. Für solche Regionen ist aber auch fraglich, ob sich bei einem Abholauftrag immer ein Dienstleister findet.

Die Optimierung der Stoppzeiten durch vorzeitige Anmeldung wurde bereits oben erwähnt. Hinter diesem Ansatz verbirgt sich die Idee, die Ankunft einer Abholung auf dem Sammelplatz anzukündigen. Dann können dort notwendige Maßnahmen eingeleitet werden, um die Stoppzeit so gering wie möglich ausfallen zu lassen. Im Detail müssten diese Maßnahmen zwischen den beteiligten Parteien und je nach örtlichen Gegebenheiten kooperativ ausgearbeitet werden. Beispielhafte Maßnahmen sind:

- Sperrung von Parkflächen zur erleichterten An/Abfahrt,
- Vorbereitung der Behälter auf Abholung durch den Dienstleister,
- Vorbereitung des Personals auf Ankunft des Dienstleisters zur Vermeidung der Suchzeiten nach Ansprechpartnern und
- Räumung von Flächen für Behältertausch.

Die Voranmeldung der Ankunft kann zweistufig erfolgen: Zunächst am Vortag durch die Anmeldung der Tour bei allen angesteuerten Adressen. Dies kann automatisiert per SMS auf das Handy des verantwortlichen Ansprechpartners in der Sammelstelle erfolgen. Eine entsprechende Erweiterung von Tourenplanungssoftware ist mit überschaubarem Aufwand möglich. Größere Herausforderung ist die Pflege der Stammdaten, in diesem Fall der aktuellen Handynummern aller Ansprechpartner. In der zweiten Stufe kann die Ankunft einige Minuten im Voraus angemeldet werden. Selbstverständlich ist dies telefonisch möglich, aber während der Fahrt aufwendig und zudem gefährlich. Eine automatisierte Lösung könnte auf Lokalisierungsdaten des Transportmittels aufsetzen. Dazu müssen die genutzten Fahrzeuge mit Navigationsgeräten ausgestattet werden, die auch in der Lage sind ihre Position an ein übergeordnetes System zu melden. Durch sogenanntes Geofencing wird dann ein virtueller Zaun um die Sammelstelle gelegt. Dieser besteht aus einer Kette von Geokoordinaten in einem definierten Umkreis um die Sammelstelle. Das Navigationsgerät auf dem Fahrzeug registriert, wenn dieser virtuelle Zaun durchfahren wird und setzt eine SMS Nachricht an den Ansprechpartner auf der Sammelstelle ab. Je nachdem wie der Radius um die Sammelstelle dimensioniert ist, ist nun bekannt, wann in etwa das Fahrzeug eintrifft. Alternativ kann das Navigationsgerät auch die berechnete Ankunftszeit z.B. 10 Minuten im Voraus melden. Allerdings müsste dafür für jede Sammelstelle die Routenplanung angestoßen werden.

Alle angesprochenen Ansätze könnten umgesetzt werden, wenn Sammelstellen digital in eine Recycling-Kette integriert werden. Dazu fehlt heute die entsprechende Software mit geeigneten Schnittstellen zu nachgelagerten Stufen der Recyclingkette, die Entwicklung eines „Warenwirtschaftssystems“ für Sammelstellen. Warenwirtschaftssystem ist ein Oberbegriff für Software, die Warenbewegungen in Unternehmen abbildet. Klassische Funktionen sind:

- Wareneingangsmodul,
- Warenausgangsmodul,
- Dispositions- und Bestellwesenmodul,
- Warenbewegungs- und Bestell-Dokumentation und
- Controllingmodul.

Diese sind auf die Prozesse einer Sammelstelle anzupassen, insbesondere die Wareneingänge, da diese nicht durch Bestellungen verursacht werden. Hier wäre bspw. eine Nutzung von Prognoseverfahren wie zu Beginn des Kapitels geschildert hilfreich, um Kapazitäten zu planen oder über die Kette hinweg Abholungen bei Spitzenzeiten proaktiv zu beschleunigen. Ein solches „Sammelstellen-WWS“ böte die Möglichkeit private und kommunale Sammelstellen an Recycling-Ketten informatorisch anzubinden, Mengen informatorisch zu erfassen und entlang der gesamten Kette voraus zu planen. Sie würden den ersten Punkt eines integrierten Recycling-Managements im Sinne eines Supply Chain Managements (vgl. Prockl 2012; S. 562 – 566) darstellen.

2.2.4.1.3 Zu 1.3 Lösungen zur Anbindung von Sammelstellen für finanzielle Motivation bzw. Anreize

In dem betrachteten bestehenden System werden Dienstleister beauftragt, um die Transporte abzuwickeln. Der Anreiz ist hier klar und entspricht dem marktgängigen Preis für die Dienstleistung. Die Dienstleister übernehmen dem Prinzip entsprechend eine Teilleistung, für die sie spezialisiert sind. Näheres dazu wird im Kapitel „Lösungen aus Koordinationsaufgaben für eine Logistik als Querschnittsfunktion“¹⁷ beschrieben.

Die Bündelung mehrerer Abfälle aus einer Anfallstelle (z.B. Autokatalysatoren und Lambda-Sonden), eines Abfalls aus mehreren Anfallstellen einer Branche oder auch unterschiedlicher Branchen (z.B. Nd-Magnete aus Pedelecs und aus Industriemotoren) kann Kosteneffizienzpotenziale erschließen und stellt einen Anreiz zur Bündelung dar.

Die Sammlung an sich und die Etablierung eines übergeordneten Sammelsystems werden aktuell sowohl durch wirtschaftliche Anreize, aber auch teilweise rechtliche Vorgaben motiviert. Neue Konzepte der Motivation beziehen sich auf die Etablierung ganzer Systeme und werden ebenfalls im Kapitel „Lösungen aus Koordinationsaufgaben für eine Logistik als Querschnittsfunktion“ aufgegriffen.¹⁸

2.2.4.2 Sortierung und Demontage

2.2.4.2.1 Zu 2.1 Lösungsansätze für Sortierung und Demontage auf physischer Ebene

Sammelstellen und ihre Clusterung

Die Positionierung von Sortierungs- und Demontageprozessen entspricht der grundsätzlichen Netzwerkplanung eines logistischen Systems. Allerdings haben die Akteure hier kaum Handlungsspielraum: Systembetreiber finden meist ein gegebenes Netzwerk an Quellen vor ohne weiteren Gestal-

¹⁷ Vgl. Kapitel 2.2.4 Teil 1.4 „Lösungen aus Koordinationsaufgaben für eine Logistik als Querschnittsfunktion“

¹⁸ Vgl. Kapitel 2.2.4 Teil 1.4 „Lösungen aus Koordinationsaufgaben für eine Logistik als Querschnittsfunktion“

tungsspielraum. Auf Seite der Sortierung und Demontage sowie der Verarbeitungspunkte besteht oftmals auch wenig Handlungsspielraum. Sofern die Verarbeitung nicht selber durchgeführt wird, muss mit bereits am Markt vorhandenen Verarbeitern kooperiert werden. Diese werden in das Netzwerk eingebunden. Dennoch wird der Punkt der Netzwerkplanung in Verbindung mit Sortierung und Demontage genannt, da potenziell beide Prozesse in den Depots der Dienstleister stattfinden könnten, um die sortenreinen Wertströme zu erzeugen, die dann eine effizientere Logistik ermöglichen. Handlungsspielräume bei der Gestaltung der Netzwerke bestehen zwischen den Quellen und Senken und bei deren Zuordnung zueinander.

Ein wesentlicher Hebel ist die Clusterung von Sammelstellen zu Sammelgebieten. Diese Gebiete werden in der Regel an einen Dienstleister vergeben. Für die Sammelstellen innerhalb der Gebiete ordnet dann der Dienstleister den Sammelstellen Depots zu und organisiert die Touren mittels Tourenplanung.¹⁹

Bei der Clusterung der Gebiete wird nach Verfahren der Netzwerkplanung bzw. der Standortwahl vorgegangen (vgl. Klose, Stähly 2012; S. 527ff.). Auch wenn keine eigenen Depots betrieben werden, werden die Sammelstellen virtuellen Depots zugeordnet und deren Standort bestimmt. Bei der Zuteilung und Standortbestimmung werden Adressen sowie deren Distanzen und deren Mengenaufkommen berücksichtigt. Es wird versucht, Depotanzahl und Depotstandorte so zu definieren, dass alle Sammelstellen z.B. innerhalb eines Tages erreicht werden können. Hinzu kommt eine ausgewogene Zuteilung der Mengen zu Depots. Dies ermöglicht eine planbare Auslastung der Fahrzeuge der Dienstleister. Die beschriebene Aufgabe entspricht einer klassischen Fragestellung der linearen Optimierung und wird durch Computerprogramme unterstützt (vgl. Steglich, Feige, Klaus 2016; S. 373ff. und Feige 2009; S. 269ff). Voraussetzung für eine sinnvolle Planung und gute Planungsergebnisse ist die Verfügbarkeit von Informationen zu Sammelstellen und Mengenaufkommen, also historische Daten. Zudem sollten sich z.B. die Standorte der Sammelstellen nicht häufig oder in großer Zahl ändern. Nach Zuordnung der Sammelstellen zu Depots können diese Sammelstellen eines Depots einem Gebiet zugeordnet werden. Bei der Ausschreibung dieses Gebietes für Logistik-Dienstleister wird der optimale Standort des Depots kommuniziert. Ob der Dienstleister ein Depot am entsprechenden Punkt betreibt, kann z.B. als Vergabekriterium vorgegeben werden.

Die Zuordnung von Adressen zu Sammelgebieten ist relativ stabil und muss nicht jedes Jahr neu berechnet werden. Dennoch ist es wirtschaftlich sinnvoll, immer wieder die Zuordnung der Sammelstellen zu Sammelgebieten zu hinterfragen. Dies wird nötig weil sich Mengenaufkommen an sich oder in ihrer Lage verändern (z.B. Reduzieren des Verbrauchs an sich oder Verlagerung von Verbrauchern wegen Umzug). Zudem wird Infrastruktur verändert (z.B. Beschränkung der Nutzung von Brücken, Durchfahrtserlaubnis, Neubau von Verbindungen). Nach solchen Veränderungen können durch neue Gebietszuordnungen und eine erneute Vergabe an Dienstleister erhebliche Optimierungspotenziale freigesetzt werden. Dies gilt besonders dann, wenn in einem bestehenden Sammelsystem neue Mengen mit aufgenommen werden sollen. Ist dies der Fall, sollte dringend die Dimensionierung und Verteilung von Sammelgebieten hinterfragt und neu berechnet werden.

Wenn im System eine Demontage und Sortierung von Abfällen nötig ist und aktuell noch nicht an einem definierten Knoten stattfindet, dann können diese Aktivitäten – die Einhaltung rechtlicher Bestimmungen vorausgesetzt - in den Depots der Sammelrouten vollzogen werden. Vorteil ist, dass hier größere Mengen zusammenlaufen und durch diese Bündelung für Demontage und Sortierung „Economies of scale“ und „Economies of scope“ realisierbar sind. Hinzu kommt, dass aus den Depots wertvolle Abfälle zur Verarbeitung transportiert werden. In der Regel überbrücken die hier anstehenden Transporte weitere Distanzen. Entsprechend lohnt es sich, den Wert der transportierten Objekte zu

¹⁹ Vgl. Kapitel 2.2.4 Teil 1.1 „Lösungsansätze zur Anbindung der Sammelstellen auf physischer Ebene“

erhöhen und möglichst wenig umgebende Tara zu transportieren. Vereinfacht ausgedrückt wird an den umgebenden Materialien keine weitere Transportdienstleistung erbracht, wenn diese Bestandteile der Abfälle hier entfernt und entsorgt werden.

Demontage

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, sind nicht automatisierte Sortierung und Demontage mit erheblichen manuellen Aufwänden verbunden. Zur Reduzierung manueller Aufwände haben sich in den letzten Jahrzehnten Methoden des Lean Managements etabliert, die als besonders erfolgversprechend gelten. Lean Management hat zum Ziel, die Ineffizienzen (im Duktus des Lean Management: Verschwendung) in Wertschöpfungsprozessen zu eliminieren. Im Lean Management wird unter Verschwendung jede Aktivität verstanden, die keinen Beitrag zur Wertschöpfung leistet (vgl. Ohno 1993; S. 52ff und Womack, Jones 2003; S. 23/413 sowie Womack, Jones, Roos 1991; S. 156ff; in vereinfachter, stark anwendungsbezogener Form auch Gorecki, Pautsch 2014; S. 24). Die Verschwendungsarten, die das Lean Management definiert, sind:

- Transporte: Längere Transporte von Materialien tragen nicht zur Wertschöpfung bei.²⁰
- Bestände: Bestände, die nicht gebraucht werden, binden Ressourcen, Flächen und Kapital²¹.
- Bewegung: Unnötige Bewegungen der Mitarbeiter, um Materialien und Werkzeuge zu holen oder mehrfach dasselbe Werkstück aufzunehmen, sind nicht wertschöpfend.
- Warten: Wartezeiten in der Produktion auf Nachschub für Rohmaterial oder aufgrund eines Maschinenausfalles.
- Überproduktion: Das Herstellen von Produkten ohne Kundenaufträge verursacht nur erhöhte Lagerbestände ohne Abnahmesicherheit der Endprodukte.
- Falsche Technologie/ Prozesse: Lange Arbeitsvorgänge (minderwertiger Rohstoff, schlechtes Werkzeug) und umständliche bzw. komplexe Prozesse verschwenden Zeit und Ressourcen.
- Ausschuss/Nacharbeit: Das Herstellen defekter Teile oder Nacharbeiten an fertigen Produkten ist ebenfalls Verschwendung nach Lean Management (vgl. Gorecki, Pautsch 2014; S. 18).

Im Folgenden werden Instrumente des Lean Managements vorgestellt, da diese im Prozess der Sortierung und Demontage zur Effizienzsteigerung als besonders geeignet erscheinen:

Die **5S/5A Methode** hält zur Ordnung und Sauberkeit am Arbeitsplatz an. Es werden 5 Schritte durchlaufen:

- Seiri (Aussortieren),
- Seiton (Aufräumen),
- Seiso (Arbeitsplatz sauber halten),
- Seiketsu (Anordnung zur Regel machen – Standards),
- Shitsuke (Vorgaben einhalten und ständig verbessern) (vgl. Gorecki, Pautsch 2014; S. 116ff).

Durch die 5S-Methode können Durchlaufzeiten an einzelnen Arbeitsplätzen aufgrund von Übersichtlichkeit und Ordnung reduziert werden. Ferner kann durch Standardisierung Fehlerreduzierung erreicht werden (vgl. Gorecki, Pautsch 2014; S. 119). Reduzierte Durchlaufzeiten pro Stück führen zu einem erhöhten Output pro Mitarbeiter und damit zu sinkenden Lohnstückkosten.

²⁰ Dieser Punkt ist strittig und nicht immer eindeutig. In Abbildung 6 ist der Transport der Last Mile als wertschöpfend gekennzeichnet, da hier der Kunde bereit ist, für logistische Aufwände zu bezahlen. Dies ist nicht immer der Fall.

²¹ Vgl. Anhang 3.

Visual Management verbildlicht Arbeitsanweisungen, visualisiert Arbeitsbereiche, ordnet Werkzeuge bestimmten Plätzen zu etc. Schlüssel ist die einfache Darstellung von Informationen zu Arbeitsgängen. Diese werden stabiler durchgeführt, wenn bildliche Vorgaben im direkten Umfeld der Aktivitäten zu sehen sind. Durch Visual Management können Arbeitsabläufe einfach gesteuert und auch neuen Mitarbeitern schnell beigebracht werden (vgl. Gorecki, Pautsch 2014; S. 132ff.). Voraussetzung sind standardisierte Arbeitsabläufe, die visualisiert werden können.²²

Die Definition von Stellplätzen wird im Lean Management „Zoning“ genannt. Die Markierung von Parkplätzen ist die wohl bekannteste Umsetzung. Dies könnte z.B. bei der Reduzierung von Stoppzeiten genutzt werden, indem eindeutig gekennzeichnete Flächen freigehalten werden, um die Be- und Entladung von Behältern zu beschleunigen.

Visualisierung kann auch die Sortierung unterstützen. Durch eine visuelle Kennzeichnung von Produkten oder Bauteilen kann ein Wertstoff gekennzeichnet werden, um die Stofferkennung und damit die Sortierung zu beschleunigen. So werden z.B. Bauschaumdosen mit einem Aufkleber gekennzeichnet, der die Zugehörigkeit zum Recyclingsystem der PDR Recycling GmbH + Co KG ausweist. Im Sortierprozess identifizieren die Mitarbeiter extrem schnell die relevanten Dosen für den weiteren Prozess anhand des Aufklebers.

Poka Yoke heißt übersetzt in etwa Narrensicherheit und hat zum Ziel Fehler zu vermeiden. Häufig genanntes Beispiel für dieses Konzept ist der Dieseltankstutzen der nicht in die Tanköffnung eines Benziners passt, um so Falschbetankung zu vermeiden. Dies entspricht einem mechanischen und damit „harten“ Schutz vor Fehlern. Ein weicher Poka Yoke Schutz wäre z.B. farbliche Kennzeichnung oder die Nutzung von Schablonen. Schablonen werden beispielsweise bei der Sortierung von Briefen genutzt. Poka Yoke kann meist mit geringen Investitionen und schnellen Maßnahmen umgesetzt werden. Dennoch lassen sich erhebliche Qualitätsverbesserungen erzielen (vgl. Gorecki, Pautsch 2014; S. 199ff.).

2.2.4.2.2 Zu 2.2 Lösungsansätze in Sortierung und Demontage auf informatorischer Ebene

Zur Steuerung der Sortierung und Demontage werden im Wesentlichen zwei Informationen benötigt: Welche Stoffe sind in welchen Bauteilen verbaut? Und wie sind diese verbaut?

Diese Informationen sollten beim Hersteller des Produktes vorliegen. Bisher sind Hersteller für bestimmte Produkte zur Bereitstellung von bestimmten Demontagehinweisen verpflichtet (vgl. z.B. § 9 Altfahrzeug-Verordnung). Allerdings sind diese Informationen auch den Herstellern nicht immer für alle Stoffe und alle Bauteile bekannt. Die Informationen dazu sind in der Regel für die Beschaffung und für die Produktion notwendig. In einigen Fällen müssen auch Nachweise über verbaute Materialien geführt werden (z.B. Airbags in Fahrzeugen, da diese Anteile von Sprengstoff enthalten und potenziell gefährlich sind). Allerdings werden diese Informationen nach Abschluss der Produktion nicht weitergegeben. D.h. während der Nutzung und im Recycling-Prozess sind diese Informationen nicht ohne Weiteres zugänglich. Auch wenn über die Materialstückliste zu bestimmten Produktionschargen die Bauteile bekannt sein müssten, lassen sich diese nicht immer eindeutig z.B. zu bestimmten individuellen Fahrzeugen, Motoren, Elektrogeräten zuordnen. Es besteht also ein gewisser Graubereich, in dem nicht sicher ist, welche Teile genau verbaut wurden. Rückrufaktionen scheinen dies zu widerlegen, sind aber in der Regel so angelegt, dass bei Unsicherheit auf „Nummer sicher“ gegangen wird und auch benachbarte Chargen zurückgerufen werden. Das Problem wird bei der Ersatzteillogistik deut-

²² An der Hochschule Augsburg wird aktuell ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung IGF durchgeführt. Das Projekt hat zum Ziel, logistische Prozesse als Arbeitsanweisungen zu visualisieren, um diese Mitarbeitern zugänglich zu machen, die die deutsche Schriftsprache nicht verstehen (Migranten, EU-Ausländer, funktionale Analphabeten). So sollen diese Personengruppen in den Ersten Arbeitsmarkt integriert werden, um sich dann weiterentwickeln zu können. Vgl. HSA 2017.

lich. Es ist in der Regel klar, welches Teil für ein defektes Teil eingebaut werden muss, aber es ist eben nicht klar, welches das genau identische Teil ist.

Sowohl in der Automobilindustrie als auch in der Aviation Branche und im Maschinenbau ist das sogenannte Konfigurationsmanagement eine bisher ungelöste Herausforderung. Für die genaue Identifikation der Bauteile und auch der Wertstoffe in den Bauteilen eines Produktes wäre genau dieses Konfigurationsmanagement nötig. Mit der Konfiguration wird die exakte aktuelle Zusammensetzung eines Produktes, bis auf die Ebene kleiner Bauteile, bezeichnet. Die Schwierigkeit beim Konfigurationsmanagement beginnt schon bei der Erstkonfiguration²³ und wird durch Ersatzteilwechsel und spätere Modifikationen erschwert. Letztlich ist es bisher keinem Hersteller gelungen, serienmäßig ein Konfigurationsmanagement zu etablieren, das über den gesamten Lebenszyklus die Konfiguration aktuell hält und zugänglich macht (vgl. Bamberger, König, Pflaum 2010; 116ff).

Um für das Konfigurationsmanagement Ein- und Ausbuchungen von Bauteilen/Ersatzteilen effizient zu ermöglichen, werden immer wieder Auto-ID Lösungen diskutiert. Vorteil ist, dass hier schnell eindeutige Nummern das Bauteil identifizieren und aus dem Produkt ausbuchen bzw. in die Konfiguration einbuchen könnten. In Anhang 1 und 2 findet sich eine Übersicht über verschiedene Auto-ID Lösungen. Für das Konfigurationsmanagement kommen bevorzugt RFID-Etiketten der UHF-Technologie (sog. UHF Tags) in Frage. Hintergrund ist die Möglichkeit der Bulk-Erfassung mehrerer hundert Tags auf einmal. So könnte theoretisch die Konfiguration eines Produktes auf einmal ausgelesen werden. Allerdings ist dies in der Regel wegen des meist herrschenden metallischen Umfeldes nicht möglich. UHF Tags funktionieren auf Metall nur, wenn Abstand zum Metall gehalten wird. Dies wird bei sog. Metallmount-Tags durch eine Folie oder ähnliches Material erreicht, das den Abstand zum Metall herstellt. Allerdings sind solche Tags erheblich teurer, da das Housing, also der Aufbau des Tags durch die Abstandhalter aufwendiger ist.

Wenn auf Bulk-Erfassung verzichtet wird, kann auch andere Technologie zum Einsatz kommen. Dann muss in der Regel der RFID Tag aus der Nähe oder sogar fast mit Berührung ausgelesen werden. Der Tag trägt dabei eine eindeutige Nummer, die das Produkt repräsentiert. Die Information zum Produkt kann auf dem Tag direkt gespeichert werden oder in einem übergeordneten System zur Nummer hinterlegt werden. Der RFID Tag ersetzt oder unterstützt bei letztgenannter Lösung lediglich das Lesen der Produktnummer. Das Auslesen des Tags reduziert Fehler und geht schneller als die manuelle Eingabe einer Nummer.

Gerade für das Konfigurationsmanagement werden auch immer wieder Lösungen diskutiert, die für metallische Umgebungen entwickelt wurden. Sogenannte Schlitzantennen werden hinter einem Schlitz im Metall verbaut und können durch diesen ausgelesen werden. Aber auch hier ist nahezu eine Berührung des Tags nötig. Funken durch Metall ist physikalisch nicht möglich. Alle Lösungen, die das versprechen, werden in den Metallkörper verbaut und mit einer außenliegenden Antenne verbunden oder haben einen offenen Zugang nach Außen, durch den ausgelesen wird. Solche Lösungen sind technisch möglich, aber heute sehr teuer.

Ein funktionierendes Konfigurationsmanagement könnte alle Informationen liefern, um eine zielgerichtete Sortierung und Demontage nach Wertstoffen in den einzelnen Bauteilen zu ermöglichen. Diese Lösung scheint sehr attraktiv, allerdings sprechen – Stand heute - einige Aspekte dagegen. In Tabelle 28 werden die kritischen Punkte aufgezeigt, daneben Entwicklungen, die zur Lösung des jeweiligen Aspekts nötig wären.

²³ Hier stellt IDMS einen vielversprechenden Ansatz dar, für die Erstkonfiguration eine valide Informationsquelle zu den verbauten Stoffen zu liefern. Allerdings können spätere Reparaturen, Aus- und Umbauten aktuell in IDMS nicht sicher nachgehalten werden.

Tabelle 28: Notwendige Entwicklungen zur Nutzung von Auto-ID Systemen für Wertstoffidentifikation in Sortierung und Demontage.

Kritik heute	Notwendige Entwicklung
<p>Die Marktdurchdringung von Produkten, die heute mit Auto-ID Systemen ausgestattet werden, würde je nach Produkt und Markt 10 – 30 Jahre dauern.</p> <p>Welche Wertstoffe dann relevant sind und welche Rückgewinnungstechnik dann möglich ist, ist heute nicht absehbar.</p>	<p>Attraktive Lösung zur Nachrüstung (extrem unwahrscheinlich, da Informationen zum Teil nicht verfügbar sind)</p>
<p>RFID Tags sind heute noch zu teuer; bei Metallmount-Tags ist mit einem Preis von 80 ct zu rechnen. Bei einem Tagging von einem Drittel der ca. 10.000 Bauteile eines Autos ist mit dem Verbau mit Mehrkosten pro Auto von ca. 3.000 € pro Fahrzeug zu rechnen. Im Massenmarkt stellt dies ein Problem dar.</p>	<p>Kosten für RFID-Tags müssten deutlich reduziert werden. Diese Kosten haben eine natürliche Untergrenze, die aus den Materialkosten für die verbauten Materialien in einem Tag besteht. Bei ganz einfachen Tags liegt diese Untergrenze bei ca. 8 ct. Allerdings dürfte diese Grenze bei Metallmount Tags deutlich höher liegen. Produktionsprozesse, die diese Kostensenkung ermöglichen, sind in Erprobung.</p>
<p>Bei Produkten mit Lebenszyklen von 30 Jahren und mehr muss sichergestellt werden, dass die Tags</p> <p>a) selber überleben</p> <p>b) nach Entsorgung noch ausgelesen werden können. (Anm.: vor 30 Jahren wurden Magnetbandkassetten als Speicher eingesetzt, vor 50 Jahren Lochkarten)</p>	<p>Eine standardisierte Schnittstelle zum Tag muss etabliert werden, die dauerhaft verlässlich genutzt werden kann. (Anm.: UHF Tags nutzen heute in Europa Frequenzen, die in Asien nicht genutzt werden dürfen und umgekehrt.)</p> <p>Die Lebensdauer der RFID Tags muss über einen langen Zeitraum nachgewiesen werden. Die ältesten Tags stammen aus den 1970er Jahren und wurden zur Warensicherung genutzt. Tags nach dem EAN Com Standard existieren seit 2003.</p>
<p>Die Datenhaltung in Form eines Produktinformationskatalogs zu den Produktnummern ist auch bei Speicherung von Informationen auf dem Tag zur Sicherung notwendig. Dies ist über einen Zeitraum von 30 Jahren und mehr für alle Bauteile sehr schwer zu organisieren.</p>	<p>Ein Standard zur Datenhaltung sowie eine organisatorische Lösung, um Daten zugänglich zu halten.</p>

Auto-ID Systeme können Informationen zu Bauteilen liefern. Informationen zum Verbauort und damit zur Zugänglichkeit können nicht über eine eindeutige Nummer eines Bauteils transportiert werden. Vereinfacht ausgedrückt kann das Bauteil nicht wissen, in welchem Produkt es wo und unter welcher Zugänglichkeit verbaut ist. Lösung wäre, wenn das Konfigurationsmanagement eben genau diese Daten ebenfalls enthält. Dies ist extrem kritisch, da solche Informationen natürlich auch zum Nachbau eines Produktes durch die Konkurrenz genutzt werden könnten. Entsprechend unwahrscheinlich ist, dass Hersteller diese Informationen frei zugänglich speichern. Eine alternative Lösung wären offene Informationsplattformen, auf welchen Hersteller Produktinformationen einstellen können, aber auch

Interessenten z.B. Erfahrungen zur Zugänglichkeit von Bauteilen aus Demontage bereitstellen können. Vergleichbar mit einer Wiki-Plattform könnte so kollektives Wissen genutzt werden. Entscheidend ist eine kritische Masse an (Freizeit-) Experten, die ihre Erfahrungswerte und Informationen zu Verfügung stellen. Generell ist die Motivationslage bei der Unterstützung von Recycling-Prozessen positiv zu bewerten. Ob die kritische Masse an Interessenten erreicht würde, ist wohl nur nach einem echten „Go-Life“ einer solchen Plattform zu beantworten.

Ähnlich wie bei anderen Open-Source Projekten könnte die Sicherung, Aufbereitung und Validierung von Zugänglichkeits- und Demontage-Informationen ein Geschäftsmodell darstellen. So vertreibt die SUSE LINUX GmbH das open-Source Produkt Linux professionell und bietet zusätzliche Services wie Support und geprüfte Updates an (vgl. Suse 2017 und PC-Welt 2009).

2.2.4.2.3 Zu 2.3 Lösungsansätze in Sortierung und Demontage für finanzielle Motivation bzw. Anreize

Der finanzielle Anreiz zur Durchführung von Sortierung und Demontage wird durch die hohen Aufwände gebremst. Kosten für Sortierung und Demontage müssen durch den Verkaufspreis der gewonnenen Rohstoffe finanziert werden. Je höher die Kosten und je geringer der Wert der enthaltenen Wertstoffe sind, desto unwahrscheinlicher ist, dass ein tragfähiges Geschäftsmodell aus dem Rohstoffverkauf entwickelt werden kann. Ziel muss also sein die Kosten zu reduzieren. Aber auch wenn ein wirtschaftlicher Anreiz fehlt, ist die Kostenreduzierung, insbesondere in manuellen Prozessen sinnvoll, denn auch bei der Erfüllung rechtlicher Vorgaben ist kosteneffizientes Arbeiten anzustreben. Wie oben dargestellt, werden hier ausschließlich manuelle Prozesse betrachtet, da automatisierte Sortierung oder Demontage weniger ein logistisches Prozessproblem als vielmehr eine technische Herausforderung darstellt.

Bei manuellen Prozessen tritt über die Zeit der Durchführung und mit größeren Mengen eine Erfahrungskurve ein. Der Effekt ist, dass die Produktionszeit pro Stück immer weiter bis zu einem Minimum sinkt. Daraus folgt, dass auch die Lohnstückkosten zurückgehen. Der Effekt ist anfangs stark und schwächt sich später ab (vgl. u.a. Hirschmann 1964 und Lieberman 1984 sowie Rohrbach 1927 und Schneider 1965). In der Kontraktlogistik wird die Erfahrungskurve in die Verträge eingepreist. D.h. Logistik-Dienstleister müssen ihre Leistung jedes Jahr um einen gewissen Prozentsatz billiger anbieten. Um dieser Zielsetzung gerecht zu werden, werden Prozesse standardisiert. Aufbauend auf den Standards können Prozessverbesserungen durch Erfahrungen einfach ausgerollt werden. Dazu werden diese in den Standard eingearbeitet und auf alle Bereiche mit den gleichen Prozessen angewandt. Die Prozessverbesserungen finden oft im kleinteiligen Management von Teilaktivitäten und Arbeitsabläufen sowie in der Organisation der Arbeitsumgebung statt. Entsprechend detailliert müssen Prozessstandards ausgestaltet sein.

2.2.4.3 Rückgewinnung („Produktion“ von Sekundärrohstoffen)

2.2.4.3.1 Zu 3.1 Lösungsansätze in der Aufbereitung auf physischer Ebene

Wenn Behälter durch längere Bindung im Lager zur kritischen Ressource werden, kann dem mit Behältermanagement begegnet werden. Dies optimiert i.d.R. softwaregestützt die Anzahl, Nutzung, Wartung sowie den Umlauf der Behälter. Meist baut Behältermanagement auf der eindeutigen Kennzeichnung der Behälter durch Auto-ID Systeme auf. Hier kommen meist Barcodes oder einfache RFID Lösungen zum Einsatz. Da Behälter gebundenes Kapital darstellen, ist die Anzahl der Behälter zu minimieren bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit des Behälterkreislaufs.

Für die logistische Bearbeitung von Nebenprodukten ab Aufbereitung des Primärrohstoffs greifen die logistischen Ansätze der Distributionslogistik (vgl. u.a. Delfmann 1999 und Tompkins, Harmelink (Hrsg.) 1998 sowie Ihde 1978). Darauf sei hier verwiesen ohne näher darauf einzugehen, da diese Thematik außerhalb des Projektfokus liegt.

2.2.4.3.2 Zu 3.2 Lösungen in der Aufbereitung auf informatorischer Ebene

Um die produzierten Rohstoffe möglichst gewinnbringend zu verkaufen, können kurzfristige Abnehmerbeziehungen aufgebaut werden, um möglichst attraktive Preise zu erzielen. Das Risiko ist, dass sich kein Abnehmer findet und Lagerhaltung aufgebaut werden muss. Solche Spotmarkets sind Börsen oder Handelsplattformen, auf welchen Rohstoffe gehandelt werden. Mengen können vor der eigentlichen Produktion angeboten werden, um günstige Preise zu sichern. Allerdings muss dann auch der entsprechende Reinheitsgrad geliefert werden. Informationen zum Reinheitsgrad müssen bei dieser Lösung ggf. durch einen Gutachter bestätigt werden. Aus logistischer Sicht ist hier problematisch, dass immer wieder neue Lieferdestinationen bedient werden müssen. Dieser Mehraufwand ist unbedingt mit einzukalkulieren. In der Regel sind dies aber Standarddienstleistungen von Logistik-Dienstleistern.

Die Alternative sind langfristige Lieferbeziehungen mit Liefer-/bzw. Abnahmeverpflichtungen. Der Vorteil ist, dass Transaktionskosten (Suche des Geschäftspartners, Vertragsaushandlung, Vertragsabschluss, Kontrolle der Vertragserfüllung) (vgl. Williamson 1990; S. 21ff) deutlich niedriger liegen. Der Reinheitsgrad spielt auch hier eine Rolle, allerdings sind Gutachterkontrollen eher stichprobenartig angemessen und damit deutlich kostengünstiger.²⁴ Dies entspricht eben den niedrigeren Transaktionskosten bei der Kontrolle der Vertragserfüllung. Allerdings lassen sich nicht so attraktive Preise erzielen. Aus logistischer Sicht ist eine stabile Abnehmerbeziehung einfacher zu etablieren, da planbare Mengen auf immer gleichen Transportverbindungen distribuiert werden.

2.2.4.3.3 Zu 3.3 Lösungen in der Aufbereitung für finanzielle Motivation bzw. Anreiz

Die Alternativen von Spotmarket und langfristiger Kunden Bindung wurde bereits unter 2.2.4.3.2 abgehandelt.

2.2.4.4 Lösungen für Koordinationsaufgaben einer Logistik als Querschnittsfunktion auch nach SCM - Ansätzen

Zur Organisation der Arbeitsteiligkeit werden Aufgabenabschnitte definiert und diese Bereiche ausgeschrieben oder entsprechende Leistungspartner dafür gesucht. Für die Entsorgungslogistik entsprechen diese Abschnitte ganz grob den in Tabelle 25 genannten Tätigkeitsfeldern. Ergänzende administrative Tätigkeiten werden von Systembetreibern²⁵ oftmals selber abgewickelt. Für die Auswahl der Leistungspartner ist die Marktsituation der Leistungserbringer entscheidend. Kann unter Vielen ausgewählt werden, dann wird über eine Ausschreibung und verschiedene Bewertungskriterien und im letzten Schritt nach dem Preis die Leistung an den geeigneten Anbieter vergeben. Dies ist z.B. bei Logistikdienstleistern der Fall (vgl. Wrobel, Klaus 2009; 49ff).

Je nach Wertstoff ist die Marktsituation bei Rückgewinnern weniger günstig. D.h. es gibt nur wenige Anbieter. Auswahlkriterien sind Kapazitäten, Qualität und Preis. Der Standort spielt nicht immer eine Rolle. Aus logistischer Sicht sind Transporte innerhalb von Deutschland nahezu zu allen Destinationen binnen eines Tages zu schaffen. Die Preisunterschiede bedingt durch Distanzen fallen nur ins Gewicht wenn exorbitant hohe Mengen (also sehr viele Fuhren) gefahren werden. Ähnliches gilt für Zentraleuropa, bei wenig werthaltigen Stoffen kann die Distanz auch auf mehrere Tage ausgedehnt werden. In diesem Falle spielt dann nicht die geografische Lage einer Anlage eine Rolle sondern deren Erreichbarkeit über alternative Verkehrsmittel wie Eisenbahn oder Binnenschiff (vgl. Woitschütze 2011; S.155ff und S. 227ff).

²⁴ Dieses Vorgehen wird von der NH/HH-Recycling e. V. genutzt.

²⁵ Als Systembetreiber werden hier Unternehmen bezeichnet, die ganze Recyclingsysteme im Sinne von Recycling Ketten betreiben. Z.B. in Auftrag von Herstellern oder Herstellerverbänden, wie z.B. die Lightcycle Retourlogistik und Service GmbH zum Recycling von Leuchtmitteln.

Die oben angeführte „Make-or Buy“-Frage stellt sich i.d.R. nicht für logistische Aktivitäten. Das Angebot logistischer Leistungen durch Logistik-Dienstleister ist in Deutschland und Europa extrem breit und tief. Der Selbsteintritt ist auch bei komplexen Anforderungen selten sinnvoll. Anders ist dies bei dem Betrieb von Sortier-, Demontage- oder Aufbereitungsanlagen. Der eigene Betrieb einer Anlage ist dabei meist getrieben durch die mangelnde Verfügbarkeit von geeigneten Kapazitäten oder die räumliche Distanz zu weltweit verteilten Anlagen.

Eine Lösung zur deutlichen Effizienzsteigerung bei der Verteilung, Abstimmung und Steuerung von Aufgaben in einem Recycling-System zeichnet sich durch die Digitalisierung und Technologien der Industrie 4.0 ab. Eine allgemein akzeptierte Definition ist für beide Begriffe bisher nicht gegeben.²⁶ Allerdings werden diese Entwicklungen meist mit der Vision verknüpft, dass zukünftig Anlagen miteinander kommunizieren können und ihre Kapazitäten für bestimmte Wertschöpfungsprozesse aufeinander abstimmen und ggf. auch umplanen, wenn Störungen auftreten (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017). Diese Visionen sind nicht wirklich neu, sondern spiegeln nur Ideen wider, die in den 1990er Jahren unter dem Begriff Supply Chain Management (SCM) und Computer Integrated Manufacturing (CIM) schon einmal diskutiert wurden (vgl. zu Supply Chain Management u.a. Wannenwetsch 2005 und Prockl 2012). Dies soll nicht heißen, dass die Vorstellungen falsch oder unerreichbar sind, soll aber verdeutlichen, dass diese auch heute noch in weiter Ferne liegen und mitunter auch keine technische, sondern eine sozioökonomische und gesellschaftliche Herausforderung darstellen. Dennoch bieten die Technologien hinter den beiden Schlagworten Lösungsansätze, die neu sind und auch entsprechende Effizienzsprünge versprechen. Einige Beispiele wurden bereits auf den informatorischen Ebenen der einzelnen Stufen der Recycling-Kette aufgezeigt. Die Entwicklungen beziehen sich dabei nahezu immer auf die informatorische Ebene²⁷ und die Koordination kooperativer Tätigkeiten zwischen Teilleistungen, die heute noch nicht optimal aufeinander abgestimmt sind.

Nicht genau deckungsgleich verbergen sich hinter Digitalisierung und Industrie 4.0 folgende technischen Neuerungen:

- Internet der Dinge und Dienste

Beschreibt eine Stufe des heute bekannten Internet, das nicht nur Rechner verbindet sondern auch einzelne Objekte, die durch Klein- und Kleinstrechner sowie Funkverbindungen in das Netzwerk integriert werden. In diesem neuen, extrem feinmaschigen Netz, das nicht nur Produktionsumgebungen, sondern auch das gesamte private Umfeld umgibt, werden Dienstleistungen angeboten (vgl. Siepmann 2016; S. 17ff).

- Intelligente Sensornetze

Die Nutzung der Möglichkeiten neuer Sensorik in Kombination mit einem Netzwerk, das die Nutzung nahezu überall zulässt. Gemessen werden können u.a. Temperatur, Licht, Feuchtigkeit, Luftdruck, Druck, Beschleunigung, Position, Lage, Gase in der Umgebung, optische Informationen statisch und bewegt, etc. (vgl. Glöckler et al. 2017; S. 29ff).

- Cyberphysische Systeme

Die Kombination der physischen Ebene einer Produktionsanlage oder eines Objektes mit der informatorischen Ebene aus Daten, Informationen und den daraus generierten Diensten. Vereinfacht ist dies also eine Maschine, die in der Lage ist, auch Informationen in direkt nutzbarer Form zu kommunizieren, zunächst z.B. nur über ein Display. (vgl. Hausladen 2016; S. 139.)

²⁶ Sehr hilfreich ist die Sammlung von Definitionen die sich hinter Industrie 4.0 verbergen. Diese finden sich in Fraunhofer IOSB 2017 bzw. in VDI/VDE 2017; S. 5ff.

²⁷ Ausnahme ist der 3D Druck bzw. die additive Fertigung, der/die je nach Quelle zu Industrie 4.0 hinzu gezählt wird oder genau wegen seines physischen Charakters eines Produktionsverfahrens eben nicht.

- Assistenzsysteme

IT-Systeme, die Mitarbeitern helfen sich in der Umgebung von Produktion und produktionsnahen Dienstleistungen zurechtzufinden und effizient ihre Arbeit zu erledigen. In der Logistik sind dies „Pick by Voice Systeme“ oder Wearables (Handschuhe, Brillen etc.), die beispielsweise einen Kommissionierprozess unterstützen (vgl. Glass 2017).

- Digitale Fabrik

Bezeichnet die informativische Ebene einer industriellen Fertigungseinrichtung. Basierend auf gängigen Softwaresystemen, die zur Anlagensteuerung genutzt werden, werden neue Informationsquellen wie z.B. Maschinendaten, Daten aus intelligenten Behältern, aus Werkstücken oder auch Umgebungsdaten aus Werkshallen als erweiterte Informationsbasis genutzt, um die Fertigung effizienter zu steuern. Basis ist die Vernetzung der bereits genutzten IT-Systeme untereinander und die Ergänzung um neue Datenquellen.

- Big Data Analysis/Management

Die Daten, die in den oben beschriebenen Systemen anfallen, sind extrem umfangreich. So erzeugt beispielsweise ein Pick Roboter ca. 2GB pro Minute. Diese Daten sind sehr wertvoll für die Steuerung einer Fertigungseinrichtung, aber auch für die effiziente Leistungserstellung in andern Systemen. Allerdings steht davor ein Schritt intelligenter Auswertung dieser Datenmassen. Hier sind Analyseverfahren notwendig, die tatsächlich entscheidungsrelevante Informationen generieren und nutzbar aufbereiten.

Von diesen technischen Neuerungen ausgehend kann in kleinen Schritten in Richtung der eingangs erwähnten Visionen einer Industrie 4.0 und im vorliegenden Fall einer digitalen Recyclingkette gedacht werden. Einige Schritte erscheinen dafür nahezu immer nötig:

- Die Bereinigung der IT-Systemlandschaft

Umfasst die Abstimmung der genutzten IT-Systeme mit den durch sie unterstützten Prozessen. Hier gibt es meist Überschneidungen und Lücken, die zu ineffizienten/manuellen Prozessen oder Problemen an den Schnittstellen führen. Bei Überlagerung der Systeme in bestimmten Anwendungsfällen sind Redundanzen meist kontraproduktiv und es entsteht z.B. doppelte Datenhaltung. Lücken, die nicht digital unterstützt sind, können keine Daten liefern und haben manuelle Prozesse zur Folge, die die Lücken stopfen müssen. Prämisse ist die Durchgängigkeit bei wenigen Überschneidungen und Interaktionsfähigkeit der Systeme.

- Bereinigung der Stammdaten

Ist eine große Herausforderung für die meisten Unternehmen. Stammdaten beziehen sich z.B. auf Produktstücklisten, Informationen zu Materialien, aber auch Kunden etc. Nahezu immer finden sich Fehler in den Stammdaten der Unternehmen, z.B. Doppelungen unterschiedlicher Werte, fehlende Werte, alte Werte etc. Erst wenn das Management dieser Daten erfolgreich ist, kann eine verlässliche Analyse der Daten auch aus neuen Datenquellen erfolgen.

- Strukturierte, effiziente Prozesse

Sind Basis für eine Digitalisierung der Prozesse. Erst wenn diese stabil und effizient laufen, ist durch eine digitale Unterstützung ein Effizienzgewinn zu erwarten. Salopp ausgedrückt wird ein schlechter Prozess durch optimale digitale Unterstützung ein schlechter aber gut unterstützter Prozess. Digitalisierung alleine macht Prozesse nicht effizient. Zur Optimierung der Prozesse helfen Ansätze des Lean Managements (bei der Innenbetrachtung) und des Supply Chain Managements (bei der Abstimmung mit vor-/nachgelagerten Prozessschritten).

- IT-Sicherheit

Hat lange ein Schattendasein geführt und ist durch verschiedene Vorkommnisse²⁸ nun deutlich prä-senter. Die Sicherung von Daten aber auch von laufenden Steuerungssystemen ist fundamental. Ein Fehler an dieser Stelle kann alle Effizienzbemühungen aushebeln. Je früher die Sicherheit in die Nutzung neuer IKT eingebunden wird, desto effizienter kann diese umgesetzt werden.

Für die Recycling-Kette verbirgt sich hinter dem ersten Punkt die Schließung digitaler Lücken. Die unter 2.2.4.1.2 aufgezeigte Automatisierung oder Teilautomatisierung der Füllstände erzeugt Daten. Vergleichbare Systeme arbeiten hier heute mit Fax oder pdf Aufträgen. Die so anfallenden Daten können nur schwer ausgewertet werden. Eine Digitalisierung schafft eine neue Datenbasis und damit eine neue Entscheidungsgrundlage.

Trotz der genannten Potenziale muss weiterhin berücksichtigt werden, dass Digitalisierung kein Selbstzweck ist und auch per se keinen Mehrwert darstellt. Der eigentliche Kern einer Wertschöpfungskette darf nicht aus den Augen verloren werden. Digitalisierung ist dann hilfreich, wenn sie hilft die Kernaufgabe, besser, also schneller, kostengünstiger, qualitativ hochwertiger für den Kunden etc. zu erfüllen. Digitalisierung ist immer auch mit Kosten verbunden, die durch solche Verbesserungen zu rechtfertigen sind. Dies gilt auch für neue Geschäftsmodelle, die sich oft in eine Wertschöpfungskette integrieren und einen bestimmten Abschnitt effektiver oder effizienter machen. Auch hier trägt sich das Geschäftsmodell nur, wenn sich die Kosten für die Leistung durch die gewonnenen Einsparungsmöglichkeiten oder Umsatzsteigerungsmöglichkeiten rechtfertigen.

Ausnahmen stellen nur deskriptive Geschäftsmodelle dar, die ganze Teile einer Wertschöpfungskette oder die gesamte Kette obsolet machen und für denselben Bedarf eine alternative Lösung aufzeigen (vgl. Christensen 2017).

Die finanzielle Motivation, ein Rücknahmesystem zu etablieren, ist für viele Wertstoffe, u.a. auch die betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme, derzeit nicht ausreichend. Natürlich ist es möglich, dass sich Marktpreise verbessern oder auch Kosten für Logistik oder Rückgewinnungsprozesse sinken und so die finanzielle Attraktivität steigt. Ein weiterer Ansatz wäre es, den Begriff der Wertschöpfung oder bezogen auf das Recycling der Wertrückgewinnung auch jenseits der monetären Bewertung zu verstehen. Die Diskussion der Sinnhaftigkeit einer monetären Bewertung von Ressourcen vor dem Hintergrund einer generationsgerechten Nutzung dieser Ressourcen soll hier nicht weiter vertieft werden. Aber als weiterer Lösungsansatz für eine Motivation zur Einrichtung eines Rücknahmesystems seien hier auch Ansätze erwähnt, die eben nicht nur dem primär ökonomischen Prinzip der Gewinnmaximierung folgen, sondern bewusst auf nachhaltiges Wirtschaften setzen.²⁹ Die klar solcherart ausgerichteten Unternehmen und Geschäftsmodelle sind, bezogen auf die Gesamtwirtschaft noch marginal und haben eher den Charakter von Hilfsorganisationen³⁰. Allerdings verdeutlichen sie auch, dass es einen Anteil an Kunden gibt, die bereit sind, für nachhaltige Produkte mehr Geld auszugeben als für vergleichbare Substitute. Ein denkbare Geschäftsmodell für ein Rücknahmesystem kann also auch sein, Sekundärrohstoffe bewusst teurer auf den Markt zu bringen, um damit Kunden anzusprechen, die bereit sind, für Produkte aus wiederverwerteten Rohstoffen mehr Geld auszugeben.

²⁸ Z.B.: Automobilzulieferer Leoni verliert 40 Millionen durch Hackerangriff. Vgl. Handelsblatt 2016.

²⁹ Vgl. beispielhaft zur sozialen Nachhaltigkeit: Oxfam 2017, zur ökologischen Nachhaltigkeit Greenpeace energy 2017

³⁰ Hier gilt, dass der Aspekt der Nachhaltigkeit ein Teil des Geschäftsmodells ist. Kunden entscheiden sich bewusst gezielt für die meist teureren Produkte. Mehrkosten werden akzeptiert, um Missstände auszugleichen, die beim Kauf von Produktalternativen akzeptiert würden.

2.2.5 Informationsbedarf und -übermittlung

2.2.5.1 Informationsbedarf

Der Informationsbedarf stellt sich, je nach Akteur, betrachteten Stoff- und Materialflüssen, Produkt- oder Bauteilarten sowie den jeweiligen Branchen recht unterschiedlich dar. Dabei liegen die Hauptunterschiede in der Komplexität meist bei der Identifizierbarkeit und Erreichbarkeit der Teile. Sammlung- und Bündelung sowie die Informationen zur eigentlichen Verwertung sind meist weniger komplex.

Verschiedene Akteure verfügen über unterschiedliche Informationen und benötigen ihrerseits Informationen. Dabei erstreckt sich die Frage der Verfügbarkeit von Informationen sowohl über den kompletten Produktionsprozess als auch über die Entsorgungsprozesse.

Zur Beantwortung der Frage, welche Edel- oder Sondermetalle in einem als Abfall anfallenden Produkt in welchen Mengen vorhanden sind, sind Informationen seitens der Hersteller von Vorprodukten oder Bauteilen erforderlich. Diese Vorprodukte werden dann durch Teilehersteller verbaut und, oft über mehrere Zwischenhersteller, an die eigentlichen Produkthersteller geliefert. Im Rahmen der Produktionsplanung und der Dokumentation liegen dem Produkthersteller zwar regelmäßig Informationen darüber vor, welche und wie viele Bauteile in einem Produkt verbaut werden, deren stoffliche Zusammensetzung oder gar der Gehalt an bestimmten Sondermetallen wird aber kaum beachtet, da diese Informationen für die Produktion, die Qualitätskontrolle oder eine spätere Rückverfolgung der Teile im Fehlerfall nicht relevant sind.

An der Schnittstelle zwischen Produkt und Abfall werden sowohl Informationen über die stoffliche Zusammensetzung, als auch Informationen über die zur Verfügung stehenden Entsorgungsalternativen benötigt und ggfs. zusätzlich die Kenntnis, wie die einzelnen Teile zu identifizieren und auszubauen sind.

Im Zuge der weiteren Sammel-, Bündelungs-, Trenn- und Behandlungsprozesse der Abfallwirtschaft ist die Kenntnis über das ursprüngliche Produkt weniger von Interesse. Hier werden vor allem die Informationen über Mengen und Qualitäten der einzelnen Chargen benötigt. Teilweise werden auch Informationen benötigt, welche Rahmenbedingungen die Abfälle für die Annahme beim Verwerter einhalten müssen, um beispielsweise Vermischungsverbote einzuhalten und Störstoffe zu vermeiden. Zusätzliche Informationen über Behälter und deren Füllstände können zur Automatisierung der Abhollogistik beitragen.

Informationsbedarf Demontage

Hier werden vor allem Angaben zu den konkret vorliegenden Produkten benötigt: „Was ist drin?“ und „wie komme ich dran?“.

Je nach betrachteten Fällen ist dabei der Schwerpunkt der benötigten Informationen in der Art der kostengünstigen Demontage, der Abschätzung der zu gewinnenden Mengen und Qualitäten und der zur Verfügung stehenden Verwertungsoptionen für unterschiedliche Mengen und Qualitäten zu sehen.

Darüber hinaus benötigen Demontagebetriebe auch Informationen über die voraussichtlichen Abfallmengen, ihre Qualitäten und die Zeiträume, in denen ein bestimmtes Produkt in einer bestimmten Menge anfallen wird, um die internen Prozesse zu planen.

Für die Steuerung der Annahme-, Demontage- und Bündelungsprozesse werden einerseits Informationen über die Qualität, Zusammensetzung und erwartete Beschaffenheit der Inputströme benötigt, andererseits aber auch die Optionen, welche Qualitäten zu welchen Konditionen am Entsorgungsmarkt absetzbar sind.

Schwierig wird es insbesondere dann, wenn Entscheidungen nicht mehr einfach anhand eines Produktes, sondern stoffbezogen oder anhand der Zusammensetzung vorhandener Komponenten getroffen werden müssen.

Informationsbedarf Abholung und Bündelung

Für die Bündelung gleichartiger Chargen wird vor allem die Kenntnis, wo und wie viel zu welchem Zeitpunkt zur Abholung bereit steht, benötigt. Für Transporte und Lagerung werden ggfs. Informationen über das Vorliegen eines Gefahrstoffes und der benötigten ADR Angaben für Gefahrguttransporte benötigt. Soweit gesonderte Anforderungen gestellt werden, beispielsweise Schutz vor Nässe oder Transport in geschlossenen Behältern, müssen diese ebenfalls verfügbar sein.

Vor der Bündelung von Chargen müssen Erfordernisse aus dem späteren Entsorgungsprozess bekannt sein, beispielsweise Vermischungsverbote, welche Störstoffe ggf. entfernt werden müssen und welche Vorbehandlungen (z.B. Entmagnetisieren, Abtrennen von Kunststoffen) durchgeführt werden müssen.

Die Informationen über die weiteren Schritte oder auch alternative Entsorgungspfade werden insbesondere bei der Planung der Sammel- und Logistikprozesse benötigt. Bei bereits etablierten Prozessketten tritt vor allem die Information in den Vordergrund, welche Qualitäten und Rahmenbedingungen einzuhalten und bei Annahme zu überprüfen sind.

Informationsbedarf Verwerter

Der Verwerter benötigt Informationen über Menge, Zustand und Art der angelieferten Abfälle. Üblicherweise wird er im Rahmen von Abnahmeverträgen regeln, welche konkreten Bedingungen für die jeweilige Annahme gelten und diese auch, zumindest fallweise überprüfen. Dabei werden aber zunächst nur die wesentlichen Stoffe betrachtet, für die bereits etablierte Verfahren beim Entsorger vorliegen. Wenn der Verwerter in die Lage versetzt werden soll, weitere Stoffe wie Sondermetalle, aus den angelieferten Abfällen abzutrennen und diese selbst oder über Makler einem spezialisierten Recyclingverfahren zuzuordnen, muss bekannt sein, welche interessierenden Stoffe in den angelieferten Abfällen grundsätzlich enthalten sind. Dies ist heute oft nur durch aufwendige zielgerichtete Analyseverfahren festzustellen. Eine bessere Kenntnis der Stoffzusammensetzungen der ursprünglichen Produkte würde eine Abschätzung der Potenziale vorhandener Sammel- und Anlieferströme erheblich erleichtern und zudem die Planung, Bewertung und Umsetzung neuer Verwertungsstrategien unterstützen.

2.2.5.2 Informationsübermittlung: Beispiele zu vorhandenen Ansätzen

REACH

Die Registrierung von chemischen Stoffen erfolgt im Rahmen der europäischen Verordnung 1907/2006/EG zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe („REACH“) durch die Hersteller und Importeure in der Europäischen Union für chemische Stoffe. Bislang unterliegen die Produzenten oder Importeure von Erzeugnissen für die in diesen Erzeugnissen enthaltenen Stoffe Registrierungspflichten nach Art. 7 Abs. 1 REACH, wenn gewisse Mengenschwellen überschritten werden, bei der vorgesehenen Verwendung eine Freisetzung der Stoffe zu erwarten ist und die Stoffe für die vorgesehene Verwendung nicht bereits registriert sind. Abfälle gelten nicht als Stoff, Gemisch oder Erzeugnis im Sinne von REACH (Art. 2 Abs. 2 REACH).

REACH erfordert bislang die Registrierung von Stoffen durch Hersteller und Importeur von chemischen Stoffen. Ferner unterliegen die Produzenten oder Importeure von Erzeugnissen für die in diesen Erzeugnissen enthaltenen Stoffe Registrierungspflichten nach Art. 7 Abs. 1 REACH, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- der Stoff ist in diesen Erzeugnissen in einer Menge von insgesamt mehr als 1 Tonne pro Jahr und pro Produzent oder Importeur enthalten;

- der Stoff soll unter normalen oder vernünftigerweise vorhersehbaren Verwendungsbedingungen freigesetzt werden;
- der Stoffhersteller oder -importeure den Stoff für diese Verwendung noch nicht registriert hat (Art. 7 Abs. 6 REACH).

Ferner müssen Produzenten oder Importeure von Erzeugnissen ECHA unterrichten, wenn

- ein besonders besorgniserregender Stoff (SVHC) in diesen Erzeugnissen in einer Menge von insgesamt mehr als 1 Tonne pro Jahr und pro Produzent oder Importeur enthalten ist;
- der SVHC in diesen Erzeugnissen in einer Konzentration von mehr als 0,1 Massenprozent (w/w) enthalten ist.

Zentrales Instrument für die Kommunikation in der Lieferkette ist bei REACH bislang das Sicherheitsdatenblatt, das unter anderem erweitert wurde, um Angaben zu identifizierten Verwendungen der Stoffe und zur Beschränkung von Verwendungen zu übermitteln. Das Sicherheitsdatenblatt muss ferner sicherheitsrelevante Hinweise zur Entsorgung enthalten.

Grundsätzlich wäre es denkbar, Sicherheitsdatenblätter auch mit erweiterten Informationspflichten für das Recycling edel- und sondermetallhaltiger Abfälle zu versehen. Dies kann jedoch aus mehreren Gründen nicht empfohlen werden: Sicherheitsdatenblätter richten sich an Adressaten und Geschäftsprozesse in der Handhabungskette, für die die sicherheitsrelevanten Informationen von Bedeutung sind. Informationen zur Unterstützung des Recycling adressieren andere, nicht primär sicherheitsbezogene Unternehmensprozesse. Zudem sind Sicherheitsdatenblätter nicht an Produkte wie Motoren oder Elektronikkomponenten gekoppelt, sondern an Chemikalien. Eine Ausweitung auf Vorprodukte, Teile und Komponenten würde die Zahl der zu erfassenden und zu registrierenden Fälle drastisch erhöhen. Es käme also zu einer Überfrachtung der REACH-Prozesse und der ohnehin recht umfangreichen Sicherheitsdatenblätter mit nicht sicherheitsrelevanten und nicht adressatengerechten Informationen.

Ob eine Übertragung der Kommunikation nach REACH auf die Übermittlung von Informationen zur Unterstützung des Recycling von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen vorteilhaft wäre, kann im Wesentlichen auf die Frage reduziert werden, ob Datenblätter ein geeignetes Instrument zur Weitergabe von Informationen z.B. an Demontagebetriebe sind.

Dies ist jedoch sehr fraglich. Bei Anwendern von Chemikalien sind Sicherheitsdatenblätter aus Arbeitsschutz- und Haftungsgründen ein fester Bestandteil der betrieblichen Abläufe. Diese Anwender handhaben eine definierte, in der Regel überschaubare und von ihnen steuerbare Vielfalt an Stoffen oder Zubereitungen. Der Demontagebetrieb kann hingegen die Produktvielfalt, die bei ihm eingeht, nicht steuern. Datenblätter wird er dann nutzen, wenn sie seine Arbeit wirksam unterstützen. Insbesondere bei der Elektroaltgerätedemontage ist schon aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Produkten eine Steuerung der Arbeiten über Datenblätter kaum realistisch. Beim Rückbau etwa von Windkraftanlagen, MRT-Geräten oder anderen, weniger variantenreichen Produkten könnten Datenblätter eine Lösung zur Informationsübermittlung bis zum Entsorger sein. Wenn es sich um sehr langlebige Produkte handelt, müssen diese Unterlagen aber noch nach Jahrzehnten in verlässlich lesbarer und zuordenbarer Form verfügbar sein. Die damit verbundenen Schwierigkeiten wurden bereits erläutert. Spezifische Vorteile einer solchen Lösung sind nicht zu erkennen.

Laut Artikel 9(2) der durch die Richtlinie 2018/851/EU geänderten EG-Abfallrahmenrichtlinie werden die Unterrichtungspflichten der Hersteller und Importeure von Erzeugnissen erweitert. So wird bis Anfang 2020 bei der Europäischen Chemikalienagentur ECHA eine Datenbank über die besonders besorgniserregenden Stoffe in Erzeugnissen eingerichtet mit dem Zweck, Abfallbehndlern Zugang zu

dieser Datenbank zu gewähren. Es bleibt abzuwarten, wie diese Datenbank ausgestaltet wird, insbesondere, ob sich der von der ECHA vorgeschlagene produktbezogene Ansatz durchsetzen wird,

ECHA, Draft scenario for the database on articles containing Candidate List substances, 2018;
ECHA, Technical supporting document to the Draft scenario for the database on articles containing Candidate List substances, 2018.

Es sollte verfolgt werden, in welcher Weise diese Datenbank die Stoffdaten erfasst und verfügbar macht.

Abfallschlüsselnummern

Die derzeitige Struktur der Abfallschlüsselnummern spiegelt insbesondere die Branche wider, aus der der Abfall stammt. Das Vorhandensein bestimmter Stoffe wird hierbei nur in Einzelfällen und vor allem für die Einordnung bestimmter Abfälle als gefährliche Abfälle herangezogen.

Eine stoffbezogene Neuordnung der Abfallnummern wäre grundsätzlich denkbar. Dabei könnten für Abfälle mit Gehalten an Sondermetallen eigene Abfallnummern definiert und auch gesonderten Verwertungspfaden zugewiesen werden. Diese stoffbezogenen Abfallschlüssel Nummern müssten voraussichtlich sehr detailliert spezifiziert werden (z.B. Abfälle, die ein bestimmtes Sondermetall mit einem bestimmten Anteil enthalten) und wären dementsprechend bezüglich der notwendigen Analytik bei Eingruppierung eines vorliegenden Abfalls schwer zu handhaben. Zudem müsste eine Hierarchie für die Eingruppierung definiert werden, wenn mehrere Sondermetalle oder weitere Stoffe enthalten sind. Eine solche Eingruppierung müsste zudem in vielen Fällen chargenweise erfolgen, wenn sich Zusammensetzungen ändern können.

Grundsätzlich in Frage käme eine Nutzung der letzten Ziffern der Abfallschlüsselnummern. Zu statistischen Zwecken nutzt z.B. das Statistische Bundesamt 8-stellige Abfallschlüsselnummern zur weiteren Differenzierung der eigentlich 6-stelligen Abfallschlüsselnummern. Dies würde allerdings die Frage, ob und in welchen Konzentrationen Sondermetalle in Produkten enthalten sind, nur auf eine andere Ebene heben. Die Information müsste bei der Zuordnung der Abfallschlüsselnummern erfolgen. Wenn diese Information aber vorliegt, können entsprechende Geräte/Bauteile aber auch ohne Abfallschlüsselnummer geeigneten Verwertungspfaden zugeführt werden.

IDIS

Das International Dismantling Information System IDIS stellt für Kraftfahrzeuge detaillierte Informationen darüber bereit, welche Teile und Flüssigkeiten im Rahmen der Altfahrzeugverwertung entfernt werden müssen und wie dies erfolgt. Diese Informationen werden weltweit von den Herstellern bereitgestellt, sind in mehr als 30 Sprachen verfügbar und berücksichtigen die gesetzlichen Vorgaben in 40 Ländern. IDIS hat vor allem Stoffe im Fokus, für die eine Demontagepflicht nach EG-Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG besteht, d.h. die aufgrund der direkt von ihnen ausgehenden Gefahr (Sprengstoffe bei Airbags) oder der von ihnen ausgehenden möglichen Umweltgefährdung (Starter-Batterien, Öle) oder aufgrund ihres Wertstoffgehalts (z.B. Katalysatoren, große Kunststoffteile) vor einer weiteren Verwertung im Schredder entfernt werden müssen.

Eine Erweiterung der sehr aufwendig durch die Hersteller bereit zu stellenden Informationen auf Teile, die Edel- und Sondermetalle enthalten, ist beispielsweise durch eine Änderung der AltfahrzeugV oder der AltfahrzeugRL möglich (vgl. im Detail unter 2.3.3.2). IDIS gibt Verwertern Hinweise und Vorgehensweisen an die Hand, wenn bestimmte Teile ausgebaut oder abgetrennt werden müssen. Weiters vielfältiger werden die möglichen Demontage- und Zerlegeprozesse, wenn es zwar wünschenswert, aber nicht rechtlich vorgeschrieben ist, bestimmte Teile abzutrennen.

Informationssysteme für Ersatzteile aus gebrauchten Kraftfahrzeugen

Autoersatzteile stellen für Altfahrzeugdemontagebetriebe eine relevante Erlösquelle dar. Vorhandene Ersatzteil-Informations- und -managementsysteme bieten Informationen, welche Teile in welchen Autos verfügbar sind, wie sie ausgebaut werden können und welche Erlöse zu erzielen sind. Nach dem Ausbau eines Teiles und dem Einscannen der Teilenummer liefern die Systeme die Information, in welchen Kraftfahrzeugen diese Teile unter welchen herstellereigenen Nummern verbaut wurden oder als Ersatzteile verwendet werden können. Die Systeme gehen soweit, dass anhand der Teilenummer weitgehend automatisiert Angebote bei eBay und spezialisierten Ersatzteil Plattformen eingestellt und mit Fotos, Zustandsbeschreibung und Fahrzeugdaten (Typ, Kilometerleistung, Unfallfahrzeug oder nicht) ergänzt werden können.

Eine Erweiterung solcher Systeme mit Informationen über alternative Verwertungswege durch das Recyceln bestimmter Bauteile scheint einfach möglich. Der Hauptvorteil wäre, dass die Zerlegetiefe bei der Gewinnung von Ersatzteilen durch Altfahrzeug-Demontagebetriebe bereits sehr hoch und die Entnahme weiterer Teile oft ohne zusätzlichen Zerlegeaufwand möglich ist. Zwei Gesichtspunkte sprechen allerdings gegen diesen Ansatz. Zum einen ist fraglich, ob angesichts der überwiegend geringen Material-Einzelwerte der auszubauenden Komponenten eine solche Erweiterung für Systemanbieter und -nutzer hinreichend interessant wäre. Vor allem aber erfolgt die Vergütung solcher Komponenten bei Weitergabe in der Verwertungskette nicht nach dem Wert einzelner Komponenten sondern nach einer Wertbemessung etwa für eine Tonne einer Mischung unterschiedlicher Komponenten aus unterschiedlichen Fahrzeugen. Die einzige Information, die hierzu von Nutzen sein könnte, nämlich die nach dem Verhältnis von Komponentenmasse und Ausbauraufwand, passt nicht zu dem hinter diesen Systemen liegenden Geschäftsmodell.

2.2.5.3 Informationsverarbeitung und -bereitstellung in der Abfallwirtschaft

2.2.5.3.1 Status

Zur Bereitstellung von Informationen von Herstellern für Entsorger werden verschiedenste Systeme eingesetzt.

Kennzeichnung: Soweit dies möglich ist, können direkte Stoff- oder Entsorgungshinweise oder Symbole auf den Produkten, teilweise sogar ohne jegliche Mehrkosten, aufgebracht werden. Beispiele sind Kennzeichnungen mit dem Einwegpfandsymbol oder der Aufdruck des Entsorgungshinweises „durchgestrichene Mülltonne“ auf Batterien sowie die Kunststoffsorten-Kennzeichnung von Kunststoffen. Diese Kennzeichnungen finden sich dann meist an den Sammelstellen auf den entsprechenden Containern wieder. Solche Kennzeichnungssysteme bedingen eine überschaubare Anzahl unterschiedlicher Systeme. Diese direkte Kennzeichnung der Produkte wird bei komplexen Produkten schwierig, wenn unterschiedliche Komponenten zwar vorhanden, aber nicht sichtbar sind. Dann muss die jeweilige Kennzeichnung der Komponenten, gegebenenfalls sogar ergänzt durch eine Lagebeschreibung, auf dem Produkt wiederholt werden.

RFID Transponder sind bereits heute im Produktbereich weit verbreitet. Für den Einsatz im Rahmen von Entsorgungsprozessen müssen aber zusätzlich die Aspekte der Robustheit und Langlebigkeit der RFID Transponder über die Lebensdauer und übliche Verwendung der Produkte hinaus bedacht werden. Zudem muss die eingesetzte RFID Technologie so gestaltet sein, dass sich Transponder nach einer Sammlung nicht gegenseitig stören, nicht durch Metall abgeschirmt und aus größerer Entfernung ausgelesen werden können, siehe 2.2.4.2.2 und insbesondere Tabelle 28.

Im Rahmen von Transportvorgängen werden fast immer Informationen über die Mengen und mehr oder weniger detailliert über Qualitäten erfasst und zwischen Lieferant und Empfänger ausgetauscht. Die geschieht über **Lieferscheine** und Rechnungen, in hochorganisierten Prozessen der Herstellungslogistik auch durch **direkten Datenaustausch**.

Komplexere, technische oder zusammenfassende Informationen werden über Hersteller, Branchen, aber auch durch Entsorger, Körperschaften und Wirtschaftsverbände gezielt bei den jeweiligen Zielgruppen gestreut. Dabei kommen Flyer, **Leitfäden** oder auch Hinweise auf Aufklebern, Rechnungen und Informationsschreiben zum Einsatz. Zunehmend sind solche und weitergehende vertiefende Informationen auch in Internet Portalen abgelegt, auf die verwiesen wird.

Fallweise kennen Hersteller und Lieferanten die Endkunden und können (oder müssen) diese direkt ansprechen. Beispielsweise seien hier industrielle Kunden, Rückrufaktionen für Kraftfahrzeuge oder Komponenten für Serversysteme mit Wartungsverträgen genannt.

Teilweise übermitteln Geräte auch aktiv Informationen. Beispielsweise seien hier Wartungsanforderungen von Aggregaten im Industrie 4.0 Umfeld genannt oder ein Drucker, der automatisch neue Tonerkartuschen bestellt, wenn sich der Vorrat zu Ende neigt. Solche aktiven Systeme sind aber derzeit für den Betrieb der Geräte ausgelegt, nicht für ihr Recycling.

2.2.5.3.2 Beispiel: Rücknahmesysteme

Zwei Beispiele für etablierte Rücknahmesysteme für spezielle Produkte sind das Rücknahmesystem für gebrauchte PU-Schaumdosen der PDR Recycling GmbH + Co KG (PRD) und das Rücknahmesystem der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS Batterien) und der herstellereigenen Systeme für Geräte-Alt-Batterien. Beide Systeme wurden zur Umsetzung der rechtlichen Anforderungen der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung initiiert und organisieren den vollständigen Rücknahmeprozess von der Aufstellung der Rücknahmebehälter über die Abhol- und Bündelungslogistik (von einer Vielzahl von Erfassungsstellen) bis zum Recycling, das im Falle der Alt-Batterien durch Vertragspartner, im Falle der PU-Schaumdosen durch die PDR selbst erfolgt.

Beide Systeme nutzen zur Sammlung Bringsysteme, die unter anderem an den Verkaufsstellen verbrauchernah aufgestellt werden. Dabei übernehmen die Rücknahmesysteme die Organisation und Gestaltung der Aufstellung und Abholung. Die Behälter selbst tragen die Informationen über die Systeme und insbesondere, welche Arten von Produkten zurückgegeben werden können. Dabei ist es sicherlich von Vorteil, dass die Vielzahl der unterschiedlichen anfallenden Typen im Falle der PU-Schaumdosen begrenzt und selbst im Gerätebatteriebereich noch überschaubar ist.

Beide Systeme setzen jeweils eine telefonische Hotline ein. Auch Abholprozesse werden nicht automatisiert initiiert, sondern per Telefon oder E-Mail gemeldet. Beide Systeme arbeiten nicht kostendeckend.

2.2.5.3.3 Arten von Informationen und Gestaltung des Informationsflusses in der Akteurskette der Entsorgung

Die an den einzelnen Schritten der Entsorgung und Entsorgungslogistik benötigten Informationen können nur zum Teil durch die jeweiligen Akteure selbst gewonnen oder ergänzt werden. Häufig werden Informationen über die interessierenden Bauteile, deren Lage im Produkt und die Möglichkeit, diese Bauteile bzw. Teile derselben schnell und sicher zu gewinnen benötigt.

Hier bietet sich ein Informationsnetz an, dessen Knoten und Kanten durch die unterschiedlichen Akteure gefüllt werden müssen.

Am Beispiel von Kraftfahrzeugteilen wird aber beispielsweise bereits der Zulieferer nur über begrenzte Informationen über die in den Teilen eingesetzten Stoffe und Materialien verfügen. Diese Informationen („was ist drin?“) können nur bei den Herstellern der Komponenten abgefragt werden, die ihrerseits Einzelteile an den Zulieferer liefern. Diese Teilehersteller sind nicht notwendigerweise der Automobilbranche zugehörig. Beispielsweise wäre hier ein Hersteller von Magneten zu nennen, der Magnete an Hersteller von Elektromotoren liefert. Dieser Motorenhersteller konfektioniert Motoren, die unter anderem in Kraftfahrzeugen als Fensterheber eingesetzt werden. Diese Motoren werden von mehreren Automobilherstellern in unterschiedlichen Modellen über jeweils einen bestimmten Zeit-

raum eingesetzt. Teilweise können die eingesetzten zugelieferten Komponenten zusätzlich auch vom Fertigungswerk, in dem das Kraftfahrzeug konfektioniert und hergestellt wurde, und der Ausstattungsvariante abhängen. Ähnliche mögliche Lieferketten finden sich auch bei Magneten für Lautsprecher, Festplatten und Kopfhörer, bei größeren Motoren für Hybridfahrzeuge und E-Bikes, bei Industriemotoren und Spezialprodukten wie Nabendynamos für Fahrräder, Windkraftturbinen, MRT-Geräten und Klimaanlage.

Um also die Frage nach dem „was ist drin?“ und weitere Fragen in der Entsorgungskette sicher beantworten zu können, wird bereits ein komplexes Netz aus Informationen benötigt, das von unterschiedlichen Akteuren aus dem Produktionsprozess mit Daten befüllt werden muss. Dabei fallen unterschiedliche Informationen an:

Arten von Informationen in der Entsorgungskette

Stoffbezogene Daten: Zu Beginn der Produktions- und Lieferprozesse liegen die Informationen über die eingesetzten Stoffe und Materialien am ehesten vor. Allerdings ist längst nicht bei jedem Produktionsprozess als bekannt vorauszusetzen, welche Anteile der eingesetzten Stoffe tatsächlich im hergestellten Produkt noch vorhanden oder verfügbar sind, da dies nicht notwendigerweise im Fokus von Qualitätskontrollen steht.

Teile-/Teilproduktbezogene Informationen: Am Beginn der Fertigungskette angefallene Informationen könnten in diesem ersten Produktionsschritt analog zu Stücklisten zusammengeführt werden, um die stoffliche Zusammensetzung der Teile für die nachfolgenden Produktionsprozesse zur Verfügung stellen zu können.

Produktbezogene Informationen: Der eigentliche Hersteller oder Inverkehrbringer des Produktes, welches später einer Verwertung zugeführt werden soll, verfügt im Rahmen des Fertigungsprozesses über die Information, welche Teile und Komponenten zur Fertigung des Produktes eingesetzt werden.

Der Hersteller kann insbesondere Informationen zur Lage und eventuell zur Zugänglichkeit der betrachteten Teile liefern. Zumindest wird er bei komplexen Produkten wie einem Kraftfahrzeug Reparatur- und Wartungsinformationen bereitstellen können, aus denen die Lage der Komponenten hervorgeht und die Möglichkeit, diese auszubauen und zu ersetzen.

Demontage- und Zerlegungsinformationen: Die vom Hersteller bereitgestellten Reparaturanleitungen sind für eine effiziente Demontage oft wenig hilfreich, da bei der Demontage zur Wertstoffgewinnung auch zerstörend und somit teilweise schneller gearbeitet werden kann (vergl. Groke et al. 2017, S. 130 und 141). Der Zugang zu versteckt eingebauten Aggregaten kann erheblich einfacher werden, wenn zuvor andere Aggregate entfernt wurden. Dieses Wissen um die sachgerechte und dabei effiziente Demontage und Zerlegung (z.B. von edel- und sondermetallhaltigen Komponenten), beispielsweise eines Altfahrzeugs, stellt zum einen das betriebsinterne Knowhow des Demontagebetriebs dar, hängt zum anderen aber auch sehr stark davon ab, welche möglichen Verwertungsoptionen durch den Betrieb jeweils genutzt werden. Ein Altfahrzeug-Demontagebetrieb, der Gebraucht-Ersatzteilverkauf intensiv betreibt, hat hierbei vermutlich eine andere Demontagephilosophie, als ein Betrieb, der primär gesetzliche Vorgaben erfüllen und die Altfahrzeuge als Teil eines Schredderbetriebs dem betriebseigenen Schredder zuführen will. Meist hat ein Zerlegebetrieb wenige Schwierigkeiten, Bauteile und Komponenten zu erkennen. Die Lage und die Bauformen der wesentlichen Komponenten, die Elektromotoren oder Platinen enthalten, sind zwar je nach Fahrzeugtyp und Ausstattung unterschiedlich, aber für einen erfahrenen Mitarbeiter relativ einfach zu erkennen, insbesondere, wenn diese sichtbar sind. Weitaus mehr Schwierigkeiten bereitet es, abzuschätzen, welche Inhaltsstoffe, wie die betrachteten Edel- und Sondermetalle und welche Mengen davon tatsächlich in den einzelnen Bauteilen (z.B. Steuergeräte, Kleinmotoren) enthalten sind. Gerade wenn diese Materialien substituiert oder deren Gehalte verringert wurden, fehlen zudem diese Informationen über das konkret vorliegende Bauteil.

Sammlungsbezogene Informationen: Im Rahmen der Sammlung und Bündelung werden zunächst Informationen benötigt, wenn es bestimmte Vermischungsverbote für unterschiedliche Sammelfraktionen gibt. Vor einem konkreten Transportvorgang sind Informationen über Sammelstandorte, Container bzw. Behälter und Füllstände erforderlich bzw. hilfreich, während und nach einem konkreten Transport die Kenntnis über den Verbleib (Menge, Qualität, Lieferadresse, ggf. Chargen-/Containeridentifikatoren).

Verwertungsbezogene Informationen: Grundlegend sind die Informationen über die zur Verfügung stehenden Verwertungsverfahren und ihre Rahmenbedingungen. Kosten bzw. Erlöse, Mengen und Qualitäten sowie die Annahmebedingungen müssen bekannt sein, um Verwertungsalternativen auswählen zu können. Soweit einzelne Prozesse der Verwertung bei unterschiedlichen Akteuren stattfinden (z.B. Entfernen von Kunststoffanteilen, Entmagnetisierung, Zerkleinerung, chemische Aufbereitung), müssen die Rahmenbedingungen für jeden dieser Zwischenschritte bekannt sein.

Branchenbezogene Informationen: Branchen spielen für die Bereitstellung von Informationen und den zielgerichteten Austausch von Handlungsempfehlungen eine zentrale Rolle. Für die Planung von Entsorgungswegen und die Akquise von Mengen ist es für Entsorger essentiell, zu wissen, in welchen Branchen Bauteile mit bestimmten Stoffen eingesetzt werden. Rücknahmesysteme werden häufig dann im Rahmen der Produktverantwortung erfolgreich realisiert, wenn sie als Branchenlösung konzipiert werden. Positive Effekte, die aufgrund branchenübergreifender Bündelung von Chargen mit ähnlichem Stoffaufkommen zu erwarten sind, setzen ebenfalls zunächst die Kenntnis der Einzelbranchen voraus, bei denen Produkte bestimmter Mengen und Abfalltypen anfallen.

Einzelne Firmen und Konzerne haben oft Vorbehalte, Daten direkt an offizielle Stellen oder weitere Marktteilnehmer zu melden, zu denen keine direkte Geschäftsbeziehung besteht. Hier besteht häufig die Befürchtung, Betriebsgeheimnisse aus der Hand zu geben. Eine Sammlung und Übermittlung von Informationen und Daten durch Verbände oder unabhängige Dienstleister kann unter Umständen einen Mindestgrad an Anonymisierung der Daten und Informationen gewährleisten. Zudem haben es Branchenorganisationen oft einfacher, auf bekannte Ansprechpartner zuzugehen und für die Bereitschaft zur Datengenerierung zu werben als bis dato unbekanntes Dritte oder offizielle Stellen.

Zusätzliche Daten: Soweit Identifikationssysteme bestehen, sollten die entsprechenden Schlüssel wie Seriennummern, Bauteilnummern, Teilenummern, EAN Codes (Europäische Artikelnummern) etc. zusätzlich berücksichtigt werden. Diese Daten sind beim Lieferanten vorhanden und können eine spätere Identifikation der Teile erleichtern, da sich diese Nummern meist auf den Bauteilen wiederfinden.

Die während der verschiedenen Schritte der Vorproduktion oder Produktion eingesetzten Stoffe und Materialien können noch am ehesten während dieser Schritte benannt und in ihren Mengen beziffert oder abgeschätzt werden. In den weiteren Schritten der Produktion und Konfektionierung stehen meist Stücklisten, in denen auf gelieferte Teile und Aggregate mit den jeweiligen Identifikatoren (Teilenummer) verwiesen wird. Dabei muss zusätzlich zu den Informationen einer Stückliste festgehalten werden können, wenn sich die stofflichen Zusammensetzungen der Teile durch Substitution oder Ver-ringerung bestimmter Anteile geändert haben.

Die Informationen zu Lage und Einbau der Teile und Aggregate liegen nur bei hochgradig automatisierten Fertigungsprozessen vor und dann meist nicht in allgemeinen verfügbaren Informationssystemen, sondern integriert in Fertigungs- und Robotersteuerungen.

2.3 Rechtliche Aspekte der Ausbau-, Verwertungs- und Kennzeichnungspflichten und der Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen für edel- und sondermetallhaltige Abfallströme

2.3.1 Einleitung und rechtliche Fragestellung

Aufgrund des derzeitigen Stands der Forschung und Entwicklung steht zu erwarten, dass für bestimmte Edel- und Sondermetallabfälle mittelfristig großtechnische Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren in Deutschland zur Verfügung stehen und dann entsprechende Anlagenkapazitäten geschaffen werden. Derartige Abfälle fallen insbesondere bei der Verwertung von Altfahrzeugen sowie Elektroaltgeräten an. Daher werden im Folgenden die gesetzlichen Regelungen zur Produktverantwortung für diese beiden Abfallströme dargestellt. Für einige edel- oder sondermetallhaltige Abfallströme, wie z.B. SE-magnethaltige Industriemotoren oder Windenergieanlagen, existieren derzeit keine produktspezifischen gesetzlichen Regelungen, so dass für diese Abfallströme die allgemeinen abfallrechtlichen Regelungen eingreifen, die ebenfalls dargestellt werden. Inwieweit für weitere einzelne Abfallströme zusätzliche produktspezifische Regelwerke gesetzlich erstellt werden sollen, ist nicht Gegenstand dieses Gutachtens,

vgl. zur Produktverantwortung für Windenergieanlagen das laufende UBA-Projekt „Entwicklung eines Konzeptes und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen“, FKZ 3717313300.

Im Rahmen der Prüfung der Entwicklung geeigneter Ansätze für die Erfassungslogistik, für die Vernetzung der Akteure und für die Gestaltung der Informationsflüsse soll u. a. geprüft werden, inwieweit Ausbaupflichten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile aus Elektroaltgeräten und für edel- und sondermetallhaltige Bauteile aus Altfahrzeugen gesetzlich geregelt werden können. Des Weiteren soll geprüft werden, wie die Erreichung hinreichender Verwertungsquoten für diese edel- und sondermetallhaltigen Bauteile rechtlich sichergestellt werden kann und inwieweit Kennzeichnungspflichten für die Existenz edel- und sondermetallhaltiger Bauteile in Elektrogeräten und Altfahrzeugen gesetzlich normiert sind bzw. werden können. Schließlich soll dargestellt werden, inwieweit eine Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen bei Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen gesetzlich geregelt ist bzw. werden kann. Im Rahmen der Prüfung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes („ElektroG“) soll dabei untersucht werden, inwieweit Kennzeichnungs-, Ausbau- und Verwertungspflichten im ElektroG zulässig sind, die nur für einen Magnettyp (NdFeB) gelten, aber nicht für andere Magnettypen eingreifen.

Im Folgenden werden zunächst die gesetzlichen Möglichkeiten zur Regelung der Ausbaupflichten, der Sicherstellung von Verwertungsquoten, der Kennzeichnungspflichten und der Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen für Elektroaltgeräte dargestellt, die in den Anwendungsbereich des ElektroG fallen (2.3.2). Anschließend werden die entsprechenden Möglichkeiten für Altfahrzeuge im Sinne der Altfahrzeug-Verordnung („AltfahrzeugV“) geprüft (2.3.3). Abschließend wird auf allgemeine abfallrechtliche Regelungen (2.3.4) und die mögliche Verankerung von Kennzeichnungs- und Demontagehinweispflichten in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (2.3.5) hingewiesen.

2.3.2 Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle, die dem ElektroG unterfallen

2.3.2.1 Anwendungsbereich des ElektroG

Soweit es sich bei den edel- und sondermetallhaltigen Abfällen um Elektro- und Elektronikaltgeräte nach § 3 Nr. 3 ElektroG handelt, müssen die Anforderungen des ElektroG erfüllt werden. Nach Darstellung des Anwendungsbereichs des ElektroG (2.3.2.1.1) wird aufgezeigt, inwieweit edel- und sonder-

metallhaltige Bauteile im Rahmen der Vorbereitung der Wiederverwendung (2.3.2.2) oder im Rahmen der Erstbehandlung (2.3.2.3) nach den Vorgaben des ElektroG auszubauen sind. Ferner wird dargelegt, dass neue Verwertungsquoten im ElektroG festgelegt werden können (2.3.2.4), welche Kennzeichnungspflichten eingreifen (2.3.2.5) und welche Pflichten zu Erteilung von Demontagehinweisen gelten (2.3.2.6). Abschließend wird dargestellt, inwieweit spezifische Pflichten bezüglich NdFeB-Magnethaltiger Elektro- und Elektronikaltgeräte oder Motoren bzw. der NdFeB-Magnete rechtlich verankert werden müssten bzw. könnten (2.3.2.7).

2.3.2.1.1 Anwendungsbereich des ElektroG

Das ElektroG gilt grundsätzlich für Elektro- und Elektronikaltgeräte aus privaten Haushalten und aus anderen Herkunftsbereichen. Zwar gibt es Regelungen, die zwischen diesen Herkunftsbereichen unterscheiden, wie z. B. die unterschiedlichen Regelungen für die Sammlung und Rücknahme von Altgeräten aus privaten Haushalten in den §§ 12 ff. ElektroG einerseits und die Rücknahme von Altgeräten anderer Nutzer als privaten Haushalten (=Industrie und Gewerbe) in § 19 ElektroG andererseits. Insbesondere die Vorschriften zu den Behandlungs- und Verwertungspflichten in den §§ 20 ff. ElektroG und zu den Informationspflichten der Hersteller nach § 28 ElektroG gelten jedoch unabhängig davon, ob es sich um Elektroaltgeräte aus privaten Haushalten oder andere Elektroaltgeräte handelt.

Das ElektroG gilt jedoch nicht für ortsfeste industrielle Großwerkzeuge oder ortsfeste Großanlagen, und umfasst daher beispielsweise nicht Nd-Magnete in Elektromotoren dieser Großwerkzeuge bzw. Großanlagen wie z.B. Fertigungsstraßen oder Windkraftanlagen.

§ 2 Abs. 2 Nr. 5 und 6 ElektroG.

2.3.2.1.1.1 Ortschafte industrielle Großwerkzeuge

Ortsfeste industrielle Großwerkzeuge unterfallen nach § 2 Abs. 5 ElektroG nicht dem ElektroG. Diese Ausnahme erfolgt in Umsetzung von Art. 2 Abs. 4 lit. b der WEEE-Richtlinie. Ein ortsfestes industrielles Großwerkzeug wird in § 3 Nr. 16 ElektroG, welcher Art. 3 Abs. 1 lit. b der WEEE-Richtlinie umsetzt, definiert als

„eine groß angelegte Anordnung von industriellen Maschinen, Geräten oder Bauteilen mit einer gemeinsamen Funktion für eine bestimmte Anwendung, die

- a) von Fachpersonal dauerhaft an einem bestimmten Ort installiert und abgebaut wird und
- b) von Fachpersonal in einer industriellen Fertigungsanlage oder einer Forschungs- und Entwicklungsanlage eingesetzt und instand gehalten wird.“

Großwerkzeuge sind im Wesentlichen Maschinen, die entweder allein oder in einer Anordnung stehend, unter anderem der Herstellung oder Bearbeitung von Materialien oder Produkten dienen. Großwerkzeuge gelten dann als ortsfest, wenn eine Veränderung während der Nutzungsphase nicht vorgesehen ist. Großwerkzeuge mit einer teilweisen Beweglichkeit, z. B. auf Schienen, gelten ebenfalls als ortsfest im Sinne dieses Gesetzes. Beispiele für „ortsfeste industrielle Großwerkzeuge“ sind u. a. Fertigungsstraßen, Spritzgussmaschinen, Montagekräne und Schweißroboter, die Nd-Magnete in den dort vorhandenen Elektromotoren enthalten können,

vgl. BR-Drucks. 127/15 vom 27.03.2015, S. 120; vgl. ausführlich FAQ-Papier der Kommission zur Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten („RoHS-Richtlinie“) vom 12.12.2012, S. 10 f., auf das Ziffer 4.2 der EU-Kommission, Frequently Asked Questions on Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Mai 2014 („FAQ-WEEE“) verweist; vgl. ausführlich European weee registers network (EWRN), WEEE2 guidance document: Large-scale stationary industrial tools

(“LSSIT”), October 2016, abrufbar unter <https://www.ewrn.org/publications-events/publications/new-weee2-exclusions/>; vgl. VG Ansbach, Urteil vom 01.12.2010, AN 11 K 10.00426, BeckRS 2010, 34872.

2.3.2.1.1.2 Ortsfeste Großanlagen

§ 2 Abs. 2 Nr. 6 ElektroG regelt den Ausschluss von ortsfesten Großanlagen vom Geltungsbereich des ElektroG. In den Anwendungsbereich fallen jedoch Geräte, die nicht speziell als Teil dieser Anlagen konzipiert und darin eingebaut sind. Standardisierte, d. h. nicht ausschließlich für die Verwendung in der ortsfesten Großanlage konzipierte und in solche eingebaute Geräte, sind nicht von diesem Ausschluss erfasst,

vgl. BR-Drucks. 127/15 vom 27.03.2015, S. 115. Diese Bestimmung erfolgte zur Umsetzung von Art. 2 Abs. 4 lit. c der WEEE-Richtlinie.

Nach § 3 Nr. 17 ElektroG ist ortsfeste Großanlage definiert als

„eine groß angelegte Kombination von Geräten unterschiedlicher Art und gegebenenfalls weiterer Einrichtungen, die

- a) von Fachpersonal montiert, installiert und abgebaut wird,
- b) dazu bestimmt ist, auf Dauer als Teil eines Gebäudes oder Bauwerks an einem vorbestimmten und eigens dafür vorgesehenen Standort betrieben zu werden, und
- c) nur durch die gleichen, speziell konstruierten Geräte ersetzt werden kann.“

Ortsfeste Großanlagen sind sowohl in industriellen, gewerblichen, öffentlichen als auch in privaten/häuslichen Anwendungen zu finden. Wesentliches Merkmal ist, dass die Geräte als Teil eines Gebäudes oder Bauwerks verbaut werden. Beispiele für ortsfeste Großanlagen sind unter anderem Windkraftanlagen, die Nd-Magnete enthalten können. Großanlagen gelten als ortsfest, wenn eine Veränderung des Standortes während der Nutzungsphase nicht vorgesehen ist. Ortsfest sind sie auch dann, wenn sie teilweise beweglich sind,

vgl. BR-Drucks. 127/15 vom 27.03.2015, S. 120; Häberle, in: Erbs/Kohlhaas/Häberle, Strafrechtliche Nebengesetze, Stand: Juli 2018, ElektroG § 3 Rdn. 17.

Für Fälle, in denen es schwierig ist, Größe, Leistung und Gewicht einer Anlage zu bestimmen, ist nach Ansicht der EU-Kommission die Komplexität einer Anlage ein Anhaltspunkt für das Vorliegen einer ortsfesten Großanlage. Ausschlaggebend soll sein, dass die Anlage aus einigen hundert Komponenten bestehe, die zu verschiedenen Teilsystemen verknüpft seien und gemeinsam die Funktion der Anlage erfüllen,

vgl. ausführlich FAQ-Papier der Kommission zur Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten („RoHS-Richtlinie“) vom 12.12.2012, S. 13, auf das Ziffer 4.5 der WEEE-FAQ verweist sowie European weee registers network (EWRN), WEEE2 guidance document: Large-scale fixed installations (“LSFI“), October 2016 .

Es ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob ein ortsfestes industrielles Großwerkzeug oder eine ortsfeste Großanlage vorliegt. Soweit z. B. NdFeB-Magnete in ortsfesten industriellen Großwerkzeugen oder Großanlagen enthalten sein sollten, greifen die nachfolgend dargestellten Pflichten aus dem ElektroG nicht ein,

vgl. zu den allgemeinen abfallrechtlichen Vorschriften, die in diesem Fall eingreifen, unten unter 2.3.4.

2.3.2.2 Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung

Vor der Erstbehandlung ist zu prüfen, ob das Elektro- oder Elektronikaltgerät oder einzelne Bauteile einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können. Diese Prüfung ist durchzuführen, soweit sie technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist,

§ 20 Abs. 1 Sätze 2, 3 ElektroG; vgl. Giesberts, in: Giesberts/Hilf, ElektroG, 3. Aufl. 2018, § 20 Rdn. 15 f.

Möglicherweise können edel- und sondermetallhaltige Bestandteile von Elektro- oder Elektronikaltgeräten bereits im Rahmen der Prüfung der Möglichkeit einer Vorbereitung zur Wiederverwendung aus dem Abfallstrom ausgeschleust und insoweit aus dem Abfallregime entlassen werden. Dies würde aber voraussetzen, dass solche edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile einer Wiederverwendung zugänglich sind und nicht erst nach weiterer Behandlung bzw. Verwertung der Elektro- oder Elektronikaltgeräte ausgeschleust werden können. Der Handlungsspielraum auf der Stufe der Vorbereitung zur Wiederverwendung ist daher von den weiteren Behandlungsschritten, namentlich der Erstbehandlung und den weiteren Verwertungsmaßnahmen, abzugrenzen.

2.3.2.2.1 Abgrenzung zur Erstbehandlung

Nach § 20 Abs. 1 S. 1 ElektroG sind Altgeräte einer Erstbehandlung zuzuführen. Die Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung und die Erstbehandlung sind daher voneinander abzugrenzen.

Nach § 3 Nr. 24 ElektroG ist die Erstbehandlung

„die erste Behandlung von Altgeräten, bei der die Altgeräte zur Wiederverwendung vorbereitet oder von Schadstoffen entfrachtet und Wertstoffe aus den Altgeräten separiert werden, einschließlich hierauf bezogener Vorbereitungshandlungen; die Erstbehandlung umfasst auch die Verwertungsverfahren R 12 und R 13 nach Anlage 2 zum Kreislaufwirtschaftsgesetz; die zerstörungsfreie Entnahme von Lampen aus Altgeräten bei der Erfassung gilt nicht als Erstbehandlung; dies gilt auch für die zerstörungsfreie Entnahme von Altbatterien und Altakkumulatoren, die nicht vom Altgerät umschlossen sind;“

Demnach ist die Vorbereitung zur Wiederverwendung zwar laut Definition Teil der Erstbehandlung. Ungeachtet dessen ist die Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung jedoch der Erstbehandlung vorgelagert,

vgl. § 20 Abs. 1 Satz 2 ElektroG.

Die Pflicht zur Erstbehandlung stünde daher einer Ausschleusung edel- und sondermetallhaltiger Bestandteile von Elektro- oder Elektronikaltgeräten durch eine Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung nicht entgegen.

2.3.2.2.2 Abgrenzung zu weiteren Verwertungsmaßnahmen

Damit edel- und sondermetallhaltige Bestandteile von Elektro- oder Elektronikaltgeräten bereits vor weiteren Verwertungsmaßnahmen aus dem Abfallstrom ausgeschleust werden können, müssten sie einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können.

2.3.2.2.2.1 Begriff der Wiederverwendung bzw. der Vorbereitung zur Wiederverwendung

Für die Wiederverwendung bzw. die Vorbereitung zur Wiederverwendung gilt auf nationaler Ebene die Definition des KrWG, da das ElektroG keine eigene Definition (mehr) enthält,

vgl. Hilf/Schleifenbaum, in: Giesberts/Hilf, ElektroG, 3. Aufl. 2018, § 3 Rdn. 2; Schomerus/Fabian/Fouquet/Nysten, Juristisches Gutachten über die Förderung der Vorbereitung zur

Wiederverwendung von Elektro-Altgeräten im Sinne der zweiten Stufe der Abfallhierarchie, UBA-
Texte 36/2014, 34.

Nach § 3 Abs. 21 KrWG ist

„Wiederverwendung [...] jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.“

Nach § 3 Abs. 24 KrWG ist

„Vorbereitung zur Wiederverwendung [...] jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren“,

Auf europäischer Ebene gelten nach Art. 3 Abs. 2 Europäische Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte Nr. 19/2012 („WEEE-RL“) die Begriffsdefinitionen aus Art. 3 AbfallRL. Demnach ist nach Art. 3 Nr. 13 AbfallRL Wiederverwendung

„jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie bestimmt waren“

und nach Art. 3 Nr. 16 AbfallRL Vorbereitung zur Wiederverwendung

„jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbereitung wiederverwendet werden können“.

Zwar setzt die europäische Definition anders als die nationale zunächst dem Wortlaut entsprechend nicht voraus, dass bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung das Erzeugnis oder der Bestandteil denselben Zweck erfüllen muss,

vgl. Schomerus/Fabian/Fouquet/Nysten, Juristisches Gutachten über die Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro-Altgeräten im Sinne der zweiten Stufe der Abfallhierarchie, UBA-Texte 36/2014, 35;

allerdings nimmt die Definition Bezug auf den Begriff der Wiederverwendung, welcher die Wiederverwendung zu demselben Zweck vorschreibt, so dass sowohl im Rahmen der europäischen Definition als auch im Rahmen der nationalen Definition das Erzeugnis oder der Bestandteil zu demselben Zweck verwendet werden muss wie zuvor.

2.3.2.2.2 Abgrenzung zum Recycling

Die Vorbereitung zur Wiederverwendung ist vom Recycling abzugrenzen. Abgrenzungskriterium ist derselbe Verwendungszweck, so dass die Abgrenzung durch den Vergleich des ursprünglichen Verwendungszwecks und des Zwecks nach der Verwertungsmaßnahme erfolgt,

vgl. BT-Drs. 17/6052 (Gesetzesentwurf), S. 74; Kopp-Assenmacher/Schwartz, in: Kopp-Assenmacher, KrWG, Stand: 2015, § 3 Rdn. 110; Schink/Krappel, in: Schink/Versteyl, KrWG, 2. Aufl., § 3 Rdn. 109.

Dies erfordert Stoffidentität, d. h., das Erzeugnis darf praktisch nicht verändert werden. Von der Stoffidentität sind auch starke Gebrauchsspuren erfasst, so dass bereits ein Entfernen der Gebrauchsspuren die Stoffidentität negieren kann,

vgl. Frenz, in: Frenz/Fischer/Franßen, Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar, Stand: August 2018, KrWG, § 3 Abs. 24 Rdn. 9.

Vorbereitungshandlungen zur Wiederverwendung können beispielsweise das

„Aussortieren von noch funktionsfähigen Gegenständen aus Sachgesamtheiten“

sowie

„die Vornahme von kleineren Reparaturen, die einen Gegenstand mit wenigen Handgriffen wieder funktionstüchtig werden lassen“

sein,

vgl. BT-Drs. 17/6052 (Gesetzesentwurf), S. 75; BR-Drs. 216/11 (Gesetzesentwurf), S. 177.

In diesen Fällen kann noch von Stoffidentität ausgegangen werden. So sind lediglich geringfügige Behandlungen und Korrekturen als Vorbereitungshandlung zu kategorisieren,

vgl. Frenz, in: Frenz/Fischer/Franßen, Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar, Stand: August 2018, KrWG, § 3 Abs. 24 Rdn. 6.

In der Definition des § 3 Abs. 24 KrWG werden die drei Vorbereitungshandlungen Prüfung, Reinigung und Reparatur benannt.

Sobald die Erzeugnisse oder Bestandteile aufbereitet oder umgestaltet werden, handelt es sich mangels Stoffidentität nicht mehr um eine Vorbereitung zur Wiederverwendung.

2.3.2.2.3 Anwendung auf edel- und sondermetallhaltige Altgeräte

In Bezug auf die edel- und sondermetallhaltigen Altgeräte wird hier davon ausgegangen, dass die edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile aus den Geräten herausgelöst und anschließend aufbereitet werden müssen. Die einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile aus den Geräten oder Bauteilen dürften rein tatsächlich ohne weitere Aufbereitung oder Umgestaltung vielfach nicht unmittelbar für den gleichen Zweck zu Verfügung stehen. Damit dürften in den überwiegenden Fällen Recyclingmaßnahmen erforderlich sein und scheidet ein Ausschleusen der edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile von Elektro- und Elektronikaltgeräten im Rahmen der Prüfung der Vorbereitung zur Wiederverwendung bereits aus tatsächlichen Gründen aus.

2.3.2.3 Pflicht zur Erstbehandlung, insbesondere zur Separation von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aus Elektroaltgeräten

Da § 20 Abs. 1 Satz 1 ElektroG zwingend die Durchführung einer Erstbehandlung der Altgeräte verlangt, ist zu untersuchen, ob im Rahmen der Erstbehandlung Pflichten zur Entnahme von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen geregelt werden können, um so eine frühzeitige Separierung der Edel- und Sondermetalle zu erreichen.

2.3.2.3.1 Bestehende Anforderungen

Die Erstbehandlung hat nach § 21 ElektroG in zertifizierten Erstbehandlungsanlagen zu erfolgen. Sie zielt darauf ab, durch Separierung der Stoffe, Zubereitungen und Bauteile unterscheidbare Abfallströme zu schaffen. Die Behandlung ganzer Geräte wie etwa durch Zerkleinerung ist nicht im Sinne der WEEE-RL,

vgl. BT-Drs. 18/4901 (Gesetzesentwurf), S. 93.

Sowohl die Erst- als auch die weitere Behandlung müssen nach dem Stand der Technik i.S.d. § 3 Abs. 28 KrWG erfolgen,

§ 20 Abs. 2 S. 1 ElektroG, vgl. auch Art. 8 Abs. 3 WEEE-RL.

Bei der Erstbehandlung sind mindestens alle Flüssigkeiten zu entfernen und die Anforderungen an die selektive Behandlung nach Anlage 4 zu erfüllen,

§ 20 Abs. 2 S. 2 ElektroG, Art. 8 Abs. 2 i. V. m. Anhang VII WEEE-RL.

Bislang enthält Anlage 4 des Elektrogesetzes die Pflicht zur selektiven Behandlung nur für bestimmte edel- und sondermetallhaltige Bauteile, wie die Pflicht zur Separation der Leiterplatten. Motiv ist hier jeweils die Schadstoffentfrachtung. Demgegenüber gibt es bislang keine generelle Pflicht zur Separierung von sonder- oder edelmetallhaltigen Bauteile aus Elektro- und Elektronikaltgeräten, welche die Rückgewinnung der Sonder- oder Edelmetalle bezweckt. Darüber hinaus lassen sich aus Anlage 4 nur Vorgaben zur Separation bzw. selektiven Behandlung, nicht jedoch Vorgaben für ein Recycling oder eine Rückgewinnung edel- und sondermetallhaltiger Abfälle ableiten.

2.3.2.3.2 Handlungsoptionen des Gesetz- oder Ordnungsgebers im Rahmen der Erstbehandlung, insbesondere zur selektiven Behandlung

§ 24 ElektroG enthält eine Ermächtigungsgrundlage für den Erlass einer Rechtsverordnung, die die weiteren Anforderungen der Behandlung festlegt. In der Rechtsverordnung können nach § 24 Nr. 2 Var. 1 ElektroG auch Anforderungen an die Altgerätebehandlung gestellt werden. Eine Handlungsmöglichkeit wäre, als weitere Anforderung an die Behandlung eine Pflicht zur Entnahme von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aufzunehmen. Dadurch könnte eine Separierung der Stoffströme bereits in diesem frühen Stadium erreicht werden. Die sondermetallhaltigen Bauteile könnten ab diesem Zeitpunkt zwischengelagert werden (siehe hierzu 3.4), insofern eine weitere Behandlung bzw. Verwertung noch nicht möglich ist, während der restliche Teil des Elektro- bzw. Elektronikaltgeräts der weiteren Verwertung zugeführt werden kann. Alternativ könnte eine entsprechende Pflicht auch durch eine Gesetzesänderung in Anhang 4 ElektroG mit aufgenommen werden.

Dabei ist es denkbar, Ausbaupflichten nur für einen Magnettypen, wie z. B. Magnettyp (NdFeB) festzulegen, soweit dies mit dem Stand der Technik oder Umweltschutzerwägungen gerechtfertigt werden kann. Ferner ist es möglich – neben den Anforderungen an die Behandlung – gesetzliche Anforderungen an die Verwertung unmittelbar für die Erstbehandlungsanlagen festzulegen,

vgl. zu den Möglichkeiten der Regelung von Verwertungspflichten und -quoten für die Demontagebetriebe nach AltfahrzeugV unter 2.3.3.2.

Denkbar wäre ferner, Anforderungen an eine getrennte Erfassung speziell von edel- und sondermetallhaltigen Altgeräten festzulegen. Im Ordnungswege auf Grundlage von § 11 Nr. 1 ElektroG dürften solche Regelungen indes ausscheiden, da sie hinsichtlich der edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile nicht auf die Durchführung und Organisation der getrennten Erfassung von Altgeräten, die zur Wiederverwendung vorbereitet werden sollen, abzielen würden.

Soweit eine getrennte Erfassung speziell der edel- und sondermetallhaltigen Altgeräte für deren weitere Behandlung und Rückgewinnung ihrer edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile erforderlich wäre, bedürfte es daher einer gesetzlichen Regelung. Als Vorlage dafür könnte § 10 Abs. 1 Satz 2 ElektroG fungieren, welcher eine getrennte Erfassung von Altbatterien und Akkumulatoren vorschreibt, oder bzw. und auch § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG, der eine getrennte Sammlung von Nachtspeicherheizgeräten, die Asbest oder sechswertiges Chrom enthalten, bzw. von batteriebetriebenen Altgeräten vorsieht.

Diese Maßnahmen würden über das in der WEEE-RL festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen und damit zu einer überschießenden Umsetzung führen. Eine solche überschießende Umsetzung dürfte aufgrund der Ziele der WEEE-Richtlinie, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV zulässig sein. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass

diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen,

vgl. die Ausführungen bei vergleichbaren Ergänzungen zur AltfahrzeugV unten unter 2.3.3.1 und EuGH, Urteil vom 15.04.2010, C-64/09, juris Rdn. 35.

2.3.2.4 Handlungsoption des Gesetz- oder Verordnungsgebers zur Verankerung verbindlicher Verwertungsquoten für Edel- und Sondermetalle aus Elektroaltgeräten

2.3.2.4.1 Regelung einer Verwertungsquote

§ 22 Abs. 1 ElektroG verlangt im Gleichklang mit Art. 11 Abs. 1 und 2 WEEE-RL die Erfüllung von Verwertungsmindestquoten, die abhängig von der Kategorie der Altgeräte unterschiedlich hoch ausfallen. Die einzelnen Kategorien sind in § 2 Abs. 1 Nr. 1-10 ElektroG geregelt. Für die Berechnung der Quote wird das Gewicht der Altgeräte, die nach ordnungsgemäßer Erstbehandlung einer Verwertungsanlage zugeführt wurden, durch das Gewicht der getrennt erfassten Altgeräte derselben Gerätekategorie geteilt,

§ 22 Abs. 2 Satz 1 ElektroG.

Festzuhalten ist zunächst, dass die bislang geforderten Verwertungsquoten der WEEE-RL und des ElektroG sich jeweils auf das Gesamtgewicht der getrennt erfassten Elektroaltgeräte einer Gerätekategorie bezogen und nicht materialspezifisch untersetzt sind. Tatsächlich können sie momentan auch ohne Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erreicht werden, da deren Mengenteile sehr gering sind. Mit den bisherigen Quoten wird daher noch kein (ausreichender) Anreiz zur Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile aus Elektroaltgeräten geschaffen.

Ferner ist zu beachten, dass eine bloße Verschärfung der Anforderungen an die selektive Behandlung in einer Erstbehandlungsanlage – in einer neuen Rechtsverordnung oder in Anlage 4 ElektroG – allein nicht ausreichend sein dürfte, um die Verwertung der Edel- und Sondermetalle zwingend zu steigern. Zusätzlich könnten und müssten spezifische Verwertungspflichten oder -quoten für Edel- und Sondermetalle für die Erstbehandlungsanlagen festgelegt werden,

vgl. dazu bereits oben unter 2.3.2.3 und zu einer entsprechenden spezifischen Verwertungsquote für Demontagebetriebe in der AltfahrzeugV unten unter 2.3.3.2; siehe allerdings die Schlussfolgerungen der Kommission im Bericht vom 18.4.2017 an das Europäische Parlament und den Rat u.a. über die mögliche Festlegung gesonderter Sammelziele für eine oder mehrere der in Anhang III der Richtlinie aufgeführten Kategorien, COM (2017) 171 final.

Um das Erreichen bestimmter Verwertungsquoten speziell der Edel- und Sondermetalle zu gewährleisten, dürften daher zusätzlich flankierende Gesetzesänderungen in § 22 Abs. 1 und 2 ElektroG geboten sein. Der Gesetzgeber könnte dort zusätzliche materialspezifische Pflichten zur Zuführung zu einer Verwertung oder Verwertungsquoten für entsprechende Edel- und Sondermetalle vorgeben. Entsprechende materialspezifische Verwertungsquoten sieht beispielsweise bereits die Verpackungsverordnung vor,

vgl. Anhang I Nr. 1 Abs. 2 VerpackV bzw. ab 01.01.2019 § 16 Verpackungsgesetz, § 14 BattG i. V. m. § 3 Abs. 3.

Wie hoch die Verwertungsquote sein muss, kann stoffstromspezifisch geregelt werden. Auch hier ist es möglich, Verwertungsquoten nur für einzelne Stoffströme, wie z. B. Magnettyp (NdFeB) festzulegen, soweit dies mit dem Stand der Technik oder Umweltschutzerwägungen, auch unter Berücksichtigung der Gesamtauswirkungen und der Effizienz der Ressourcennutzung, gerechtfertigt werden kann. Die Basis der Quote kann abhängig von der technischen Machbarkeit und vom Adressaten der Verwertungspflicht festgelegt werden.

2.3.2.4.2 Korrespondierende Mitteilungspflichten

Sofern eine solch differenzierte Verwertungsquote festgelegt werden soll, ist zu beachten, dass zusätzlich zur Regelung solch differenzierter Verwertungsquoten auch weitere korrespondierende Mitteilungspflichten in § 27 und § 29 ElektroG geschaffen werden sollten, um eine entsprechende Überwachung zu gewährleisten. Diese wiederum müssten im Einklang mit Durchführungsrechtsakten der Kommission zur Festlegung eines einheitlichen Formats der Registrierung und der Häufigkeit der Berichterstattung nach Art. 16 Abs. 3 WEEE-RL stehen,

vgl. die Vorarbeiten durch Spasojevic/Swalens "Study on harmonisation of the format for registration and reporting of producers of electrical and electronic equipment (EEE) to the national register and on the frequency of reporting", Version v1.2, Januar 2016 sowie den Entwurf einer Commission Implementing Regulation (EU) of establishing the format for registration and reporting and the frequency of reporting to the register, Ares(2018)754618.

2.3.2.4.3 Änderung der Verwertungsdefinition zur Einbeziehung der Zwischenlagerung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen in die Bestimmung von Verwertungsquoten

Da bislang noch keine Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erfolgt und trotzdem die erforderlichen Verwertungsquoten des ElektroG erreicht werden, ist es möglich, dass eine Separation selbst bei anschließender Zwischenlagerung von einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen in der Praxis nicht zu Problemen beim Erreichen der Verwertungsquote führt. Sofern allerdings zusätzliche gesetzliche Anforderungen an die Verwertung festgelegt werden, kann es möglicherweise zu Problemen im Hinblick auf die zu erreichende Verwertungsquote kommen, falls die edel- und sondermetallhaltigen Bauteile zunächst separiert und zwischengelagert werden müssen, bis Verwertungsmöglichkeiten geschaffen werden.

Dies erfordert zunächst eine stoffstromspezifische Beurteilung, da die Auswirkungen einer solchen Separation und evtl. anschließender Zwischenlagerung auf die Verwertungsquote maßgeblich von dem Anteil der edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile am Gewicht des Elektro- oder Elektronikgeräts insgesamt abhängen. Näher zu untersuchen wäre daher, ab welchem Anteil eine Separation mit evtl. anschließender Zwischenlagerung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile in der Praxis zu Problemen bei der Wahrung der Verwertungsquote führen kann.

Falls in der Praxis bei der Wahrung der Verwertungsquote aufgrund der Separation und der anschließenden Zwischenlagerung sonder- oder edelmetallhaltiger Bauteile Probleme auftreten sollten, stellt sich die Frage, ob die Zwischenlagerung der sonder- oder edelmetallhaltigen Bauteile bereits als Verwertung eingestuft und bei den Verwertungsquoten mitberücksichtigt werden kann. Nach § 22 Abs. 2 Satz 2 ElektroG werden bei der Berechnung der Verwertungsquote die vorbereitenden Maßnahmen jedoch nicht bei der Anteilsberechnung berücksichtigt. Zu den vorbereitenden Maßnahmen zählt neben der Sortierung auch die Zwischenlagerung vor der Verwertung.

„Vorbereitende Maßnahmen einschließlich Sortierung und Lagerung vor der Verwertung bleiben im Hinblick auf die Berechnung der Anteile nach Absatz 1 unberücksichtigt“, vgl. § 22 Abs. 2 Satz 2 ElektroG.

§ 22 ElektroG setzt neben Art. 10 Abs. 2 WEEE-RL auch Art. 11 Abs. 2 UAbs. 2 WEEE-RL um, wonach

„vorbereitende Maßnahmen einschließlich Sortierung und Lagerung vor der Verwertung [...] im Hinblick auf die Erreichung dieser Zielvorgaben unberücksichtigt“

bleiben.

Demnach wurde die Regelung nahezu wortgleich übernommen. Der einzige Unterschied liegt in der Formulierung

„Berechnung der Anteile nach Absatz 1“ (national)

und

„Erreichung dieser Zielvorgaben“ (europäisch)

bzw. in der englischen Version

„the achievement of these targets“.

Der benannte Passus wurde erst durch einen Änderungsantrag in den Richtlinienvorschlag mit aufgenommen und lautete wie folgt:

„Die Bereiche Lagerung, Sortierung und Vorbehandlung in den Verwertungsanlagen bleiben bei der Berechnung der Erfüllung dieser Zielvorgaben unberücksichtigt.“

Vgl. Europäisches Parlament, Plenarsitzungsdokument – Bericht vom 08.09.2010 über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, A 7-0229/2010, S. 36 (Änderungsantrag 45).

Zur Begründung wird in diesem Zusammenhang wie folgt ausgeführt:

„Damit ist gewährleistet, dass nur die endgültigen Verwertungsmaßnahmen als Verwertung berechnet werden. Andernfalls würden auch Abfälle als verwertet eingestuft, die zwar einer Verwertungsanlage zugeführt werden, dort jedoch über das Vorbehandlungsstadium der Sortierung und Lagerung nicht hinauskommen und dann deponiert werden“,

vgl. Europäisches Parlament, Ausschuss für Umweltfragen, Volksgesundheit und Lebensmittelsicherheit, Bericht vom 08.09.2010 über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Plenarsitzungsdokument A 7-0229/2010, S. 36 (Änderungsantrag 45).

Demnach können die edel- und sondermetallhaltigen Bauteile der Elektro- und Elektronikaltgeräte, auf die noch vorbereitende Maßnahmen – d. h. auch die Zwischenlagerung – angewendet werden, nicht bei den Verwertungsquoten mitberücksichtigt werden.

Ob eine Separation und evtl. anschließende Zwischenlagerung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen von Elektro- und Elektronikaltgeräten im Hinblick auf die zu erreichende Verwertungsquote allerdings in der Praxis zu Problemen führen kann, erfordert eine stoffstromspezifische Beurteilung. Denn die Auswirkungen einer solchen Separation und Zwischenlagerung auf die Verwertungsquote hängen maßgeblich von dem Anteil der edel- und sondermetallhaltigen Bestandteile am Gewicht des Elektro- oder Elektronikaltgeräts insgesamt ab. Zeitliche gesetzliche Vorgaben, wann die Verwertung beendet sein muss, gibt es nicht. Insofern kann eine Verwertung, die im Anschluss an die Zwischenlagerung durchgeführt wird, bei den Verwertungsquoten berücksichtigt werden. Da bislang keine separate Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erfolgt und trotzdem die erforderlichen Verwertungsquoten erreicht werden, ist es möglich, dass eine Separation und anschließende Zwischenlagerung von einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen bis zur tatsächlichen und endgültigen Verwertung in der Praxis nicht zu Problemen beim Erreichen der Verwertungsquote führt. Gesonderte stoffspezifische Berichtspflichten über die Zuführung zur Zwischenlagerung, spätere Entnahme aus dem Zwischenlager und anschließende Verwertung wären mit hohem bürokratischem Aufwand auf Seiten der Abfallerzeuger und Behörden verbunden und müssten dem Verhältnismäßigkeitsprinzip genügen, d. h. insbesondere angemessen sein. Dabei wird auch die Menge der zu erwartenden edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme zu berücksichtigen sein.

Falls in der Praxis das Erreichen der Verwertungsquote aufgrund der Zwischenlagerung problematisch werden sollte, wäre ein möglicher Lösungsansatz die Änderung des ElektroG dahingehend, bereits die Zwischenlagerung, zumindest die von edel- und sondermetallhaltigen Elektro- und Elektroni-

kaltgeräten, ausnahmsweise als Verwertung einzustufen, sofern die tatsächlich folgende Verwertung zugesichert wird.

Einer solchen Gesetzesänderung auf nationaler Ebene stehen allerdings die Vorgaben der WEEE-RL entgegen, welche die Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Sofern eine Änderung der Verwertungsdefinition angestrebt wird, ist daher auch der europäische und nicht allein der nationale Gesetzgeber gefragt.

2.3.2.5 Kennzeichnungspflichten

Bislang verpflichtet § 9 Abs. 1 ElektroG zur Kennzeichnung von Elektro- und Elektronikgeräten, die erlaubt, dass der Hersteller eindeutig zu identifizieren ist und festgestellt werden kann, ob es sich um ein historisches Altgerät handelt, das vor dem 13.08.2005 in Verkehr gebracht wurde (bzw. vor dem 24.10.2015 für Leuchten aus privaten Haushalten und Photovoltaikmodule, die Altgeräte sind),

§§ 9 Abs. 1, 3 Nr. 4 ElektroG.

Diese Kennzeichnungspflicht dient der Durchsetzung des Konzepts der Herstellerverantwortung und einer effektiven Marktüberwachung und der Umsetzung von Art. 14 Abs. 4 und Art. 15 Abs. 2 WEEE-RL,

vgl. Giesberts, in: Giesberts/Hilf, ElektroG, 3. Aufl. 2018, § 9 Rdn. 6 f.; vgl. BR-Drucks. 127/15 vom 27.03.2015, S. 125.

Ferner sind die Elektro- und Elektronikgeräte mit dem Symbol nach Anlage 3 ElektroG dauerhaft zu kennzeichnen, sofern eine Garantie nach § 7 Absatz 1 ElektroG erforderlich ist. Eine Garantie ist nur für Geräte erforderlich, die in privaten Haushalten genutzt werden.

Bei diesem Symbol handelt es sich um das Symbol für die getrennte Erfassung von Elektro- und Elektronikaltgeräten, das eine durchgestrichene Abfalltonne auf Rädern darstellt. Dieses Symbol ist sichtbar, erkennbar und dauerhaft anzubringen. Sofern es in Ausnahmefällen auf Grund der Größe oder der Funktion des Elektro- oder Elektronikgerätes erforderlich ist, ist das Symbol statt auf dem Gerät auf die Verpackung, die Gebrauchsanweisung oder den Garantieschein für das Elektro- oder Elektronikgerät aufzudrucken,

§ 9 Abs. 2 i. V. m. Anhang 3 ElektroG.

Diese Kennzeichnung soll den Endnutzer darüber informieren, dass das Elektroaltgerät nicht über die kommunale Restmülltonne zu entsorgen ist, und dient der Umsetzung von Art. 14 Abs. 4 WEEE-RL. Damit soll die Beseitigung von Elektro- und Elektronikaltgeräten als unsortierter Siedlungsabfall möglichst gering gehalten und die getrennte Sammlung erleichtert werden,

vgl. BR-Drucks. 127/15 vom 27.03.2015, S. 125; Art. 14 Abs. 4 WEEE-RL.

Weitergehende Kennzeichnungspflichten sind weder in der WEEE-RL noch im ElektroG enthalten. Eine Ergänzung der Kennzeichnung der Elektro- und Elektronikgeräte dahingehend, dass in ihnen edel- und sondermetallhaltige Bauteile enthalten sind, ist bislang nicht vorgesehen.

Sofern Kennzeichnungspflichten für NdFeB-haltige Bauteile erwogen werden, müsste daher Art. 14 WEEE-RL oder zumindest § 9 ElektroG entsprechend angepasst werden.

Es erscheint jedoch zweifelhaft, dass eine solche Kennzeichnungspflicht verhältnismäßig ist. Eine Kennzeichnungspflicht für edel- und sondermetallhaltige Bauteile würde zunächst keine bessere Identifizierung der Hersteller und Durchsetzung der Herstellerverantwortung bewirken und könnte damit nicht auf Art. 14 Abs. 4 und Art. 15 Abs. 2 WEEE-RL gestützt werden.

Ferner ist auch nicht ersichtlich, dass die Informationen über die edel- und sondermetallhaltigen Bauteile bei den Nutzern der Elektro- und Elektronikaltgeräte erforderlich sind, da diese nicht die Erstbe-

handlung durchführen. Bislang müssen die Besitzer von Altgeräten diese nach § 10 Abs. 1 Satz 1 ElektroG einer vom unsortierten Siedlungsabfall getrennten Erfassung zuführen. Eine weitere Kennzeichnung der Altgeräte wäre nur notwendig, wenn die Besitzer die edel- und sondermetallhaltigen Elektro- und Elektronikaltgeräte einer – von den übrigen Altgeräten getrennten – gesonderten Erfassung zuführen müssten,

vgl. dazu unter 2.3.4.

2.3.2.6 Behandlungs- und Demontagehinweise

Bislang enthält § 28 ElektroG in Umsetzung des Art. 15 Abs. 1 der WEEE-RL verschiedene Informationspflichten der Hersteller. So muss jeder Hersteller den Wiederverwendungseinrichtungen und den Anlagen zur Verwertung insbesondere Informationen über

- die Wiederverwendung,
- die Vorbereitung zur Wiederverwendung und
- die Behandlung für jeden in Verkehr gebrachten Typ neuer Elektro- und Elektronikgeräte

kostenlos zur Verfügung zu stellen. Die Informationen sind innerhalb eines Jahres nach dem Inverkehrbringen des jeweiligen Gerätes in Form von Handbüchern oder elektronisch zur Verfügung zu stellen. Aus den Informationen muss sich ergeben, welche verschiedenen Bauteile und Werkstoffe die Elektro- und Elektronikgeräte enthalten und an welcher Stelle sich in den Elektro- und Elektronikgeräten gefährliche Stoffe und Gemische befinden.

Die Informationen der Hersteller sollen Rückschlüsse darauf zulassen, welche Bauteile und Werkstoffe verbaut sind und wo diese im Gerät zu finden sind, um die Voraussetzungen für die selektive Behandlung nach Anlage 4 zu schaffen,

vgl. BR-Drs. 127/15 vom 27.03.2015, S. 142.

Soweit gesetzlich weitere Anforderungen an die Erstbehandlung edel- und sondermetallhaltiger Altgeräte in der Anlage 4 oder in einer Rechtsverordnung geschaffen werden sollten, wirken sich diese unmittelbar auf die Informationspflichten der Hersteller nach § 28 Abs. 1 ElektroG aus. Sollten dort Anforderungen für das Ausschleusen von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen festgelegt werden, müssen die Hersteller auch die entsprechenden Hinweise zur Verfügung stellen.

Vorgaben zur Art der Weitergabe der Informationen an die Behandlungsanlagen ergeben sich derzeit aus der WEEE-RL und dem ElektroG. Gefordert ist demnach eine Bereitstellung in Form von Handbüchern oder in elektronischer Form (CD-ROM, online-Dienste).

Eine gesetzliche Verpflichtung zur Übermittlung an ein zentrales, ggf. internetbasiertes EDV-System besteht derzeit nicht. Soweit ersichtlich, gibt es derzeit für den Bereich der Elektroaltgeräte auch keine Zentraldatenbank wie im Bereich der Altfahrzeuge,

vgl. zur IDIS-Plattform, auf welcher Demontagehinweise für Altfahrzeuge abgerufen werden können, unten unter 2.3.3.4; vgl. die neue Online-Plattform für Recycler von Elektro- und Elektronikaltgeräten des WEEE-Forums sowie der Herstellerverbände Digitaleurope und Ceced (www.i4r-platform.eu); vgl. EUWID Recycling und Entsorgung 11/2018, S. 8.

Soweit zur Beseitigung von Informationsdefiziten oder Erleichterung des Zugangs zu diesen Demontagehinweisen eine Zentralisierung dieser Informationen für erforderlich erachtet werden sollte, hängt der gesetzliche Regelungsbedarf vor allem von der erforderlichen und zweckmäßigen Ausgestaltung dieser Zentraldatenbank ab. Neben einer Errichtung durch freiwillige oder selbstverpflichtende Kooperation der Hersteller käme eine gesetzliche Verpflichtung zur Errichtung einer solchen Zentraldatenbank in Frage. Soweit eine Verpflichtung zur Übermittlung der Demontagehinweise an eine solche Zentraldatenbank bestehen soll, wäre diese Verpflichtung aufgrund der damit verbundenen Eingriffe gesetzlich zu regeln. Dasselbe gilt für Vorgaben hinsichtlich der Trägerschaft. Der Aufgabenkatalog der Gemeinsamen Stelle i.S.d. §§ 31 ff. ElektroG sieht derzeit die Führung einer solchen Demontagehinweisdatenbank nicht vor. Dass die Führung einer solchen Demontagehinweisdatenbank nur in hoheit-

licher Verantwortung zulässig sein könnte, drängt sich nicht auf, hinge aber letztlich von der näheren Ausgestaltung und den Anforderungen an und den Umgang mit dieser Datenbank ab. Bei der Ausgestaltung einer solchen verpflichtenden Demontagehinweisdatenbank und auch weiterer gesetzlicher Informationspflichten der Hersteller wäre jedenfalls ein ausreichender Schutz der Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse der Hersteller sowie die Beachtung der allgemeinen datenschutz- und wettbewerbsrechtlichen Vorgaben zu gewährleisten.

2.3.2.7 Ergänzende Hinweise zu spezifischen Pflichten bezüglich NdFeB-Magnet-haltiger Elektro- und Elektronikgeräte oder Motoren bzw. der NdFeB-Magnete selbst

Soweit spezifische Pflichten für NdFeB-Magnet-haltige Altgeräte im ElektroG geregelt werden, würde damit die abfallrechtliche Produktverantwortung der Hersteller der Elektro- und Elektronikgeräte konkretisiert.

Daraus ergibt sich zum einen, dass die Verhältnismäßigkeit gewahrt bleiben muss, auch soweit Hersteller nicht NdFeB-Magnet-haltiger Elektro- und Elektronikgeräte mit diesen Pflichten belastet werden. Zum anderen folgt daraus, dass für eine Heranziehung der Zulieferer von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren (soweit diese nicht selbst als Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten einzustufen sind) oder von sonstigen NdFeB-Magnet-haltigen Bauteilen sowie der Hersteller von NdFeB-Magneten selbst weitergehende Regelungen außerhalb des ElektroG erforderlich sind.

2.3.2.7.1 Verhältnismäßigkeit spezifischer Pflichten bezüglich NdFeB-Magnet-haltiger Elektro- und Elektronikgeräte

Die Entsorgungspflichten müssen vor dem Hintergrund der damit verbunden Grundrechtseingriffe das Verhältnismäßigkeitsprinzip und auch den Gleichbehandlungsgrundsatz wahren. Sie dürfen die Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten nicht unzumutbar und gleichheitswidrig belasten. Die Adressierung der Rücknahme- und Entsorgungspflicht nach dem ElektroG differenziert dazu bereits nach der Art des Altgeräts (vgl. oben unter 2.3.2.1.1).

2.3.2.7.1.1 Altgeräte anderer Nutzer als privater Haushalte

Für Altgeräte anderer Nutzer als privater Haushalte (sog. b2b-Altgeräte) trifft die Rücknahmepflicht grundsätzlich den Hersteller oder im Falle der Bevollmächtigung nach § 8 ElektroG dessen Bevollmächtigten, § 19 Abs. 1 ElektroG. Damit greift eine individuelle Produktverantwortung. Eine unzumutbare Belastung der Hersteller nicht NdFeB-Magnet-haltiger Elektro- und Elektronikgeräte mit „fremden“, NdFeB-Magnet-haltigen Altgeräten scheidet insoweit aus.

2.3.2.7.1.2 Altgeräte aus privaten Haushalten

Für Altgeräte aus privaten Haushalten (sog. b2c-Altgeräte, vgl. § 3 Nr. 5 ElektroG) greift die im Grundsatz kollektivierte Rücknahme- und Entsorgungspflicht nach § 16 ElektroG ein. Eine differenzierte Zuweisung der Produktverantwortung ermöglichen die verschiedenen Sammelgruppen i.S.d. § 14 Abs. 1 ElektroG und die innerhalb der Gerätekategorien gebildeten Gerätearten i.S.d. § 3 Nr. 2 ElektroG. Sofern NdFeB-Magnet-haltige Altgeräte allerdings (weiterhin) mit nicht NdFeB-Magnet-haltigen Altgeräten in einer Sammelgruppe i.S.d. § 14 Abs. 1 ElektroG zusammengefasst würden, können die Entsorgungspflichten einschließlich spezifischer Pflichten bezüglich NdFeB-Magnet-haltiger Elektro- und Elektronikgeräte im Einzelfall auch Hersteller von nicht NdFeB-Magnet-haltigen Elektro- und Elektronikgeräten treffen. Nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts darf der Gesetzgeber aber bei der Ausübung seines Gestaltungsermessens praktischen Erfordernissen Rechnung tragen und auch von einer weiteren Ausdifferenzierung der Sammelgruppen absehen. Insoweit steht dem Gesetzgeber eine gewisse Typisierungsbefugnis zu,

vgl. BVerwG, Urteil vom 26.11.2009, 7 C 20/08, juris Rdn. 19-22.

Nach diesen Maßstäben ist die Zulässigkeit einer Gruppenverantwortung der Hersteller für Altgeräte ungeachtet NdFeB-Magnet-haltiger Bauteile nicht ausgeschlossen. Ob mit spezifischen Entsorgungspflichten bzgl. der NdFeB-Magnet-haltigen Altgeräte eine unzumutbare Belastung der Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten einhergeht, dürfte aber vor allem auch eine Frage der tatsächlichen praktischen und kostenmäßigen Belastung sein, die diese spezifischen Entsorgungspflichten gegenüber der Entsorgung von nicht NdFeB-Magnet-haltigen Altgeräten bedeuten würden.

2.3.2.7.2 Heranziehung der Zulieferer von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren und der NdFeB-Magnete

Sofern unmittelbar die Zulieferer von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren (soweit nicht selbst Elektro- und Elektronikgeräte) oder sonstigen NdFeB-Magnet-haltigen Bauteilen zur Rücknahme und Entsorgung herangezogen werden sollen, geht dies über die derzeitige Konkretisierung der abfallrechtlichen Produktverantwortung der Hersteller der Elektro- und Elektronikgeräte hinaus. Dasselbe gilt, soweit NdFeB-Magnete aus solchen Motoren oder Bauteilen betroffen sind, die nicht in Geräten enthalten sind, die dem Anwendungsbereich des ElektroG unterfallen (insbesondere in ortsfesten industriellen Großwerkzeugen oder ortsfesten Großanlagen oder Teile derselben),

vgl. § 2 Abs. 2 Nr. 5 und 6 (auch i. V. m. Nr. 2) ElektroG, s. o. unter 2.3.2.1.1.

Dies gilt auch und erst recht, soweit eine weitere Stufe früher die Hersteller der NdFeB-Magneten zur Rücknahme und Entsorgung herangezogen werden sollen.

Für die Konkretisierung einer abfallrechtlich erweiterten Produktverantwortung i.S.d. § 23 KrWG

- (i) der Zulieferer von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren (soweit nicht selbst Elektro- und Elektronikgeräte) oder von sonstigen NdFeB-Magnet-haltigen Bauteilen,
- (ii) der Hersteller von NdFeB-Magnet-haltigen ortsfesten industriellen Großwerkzeugen oder ortsfesten Großanlagen oder auch
- (iii) der Hersteller von NdFeB-Magneten selbst

wären weitergehende eigenständige Regelungen erforderlich und zugleich mit den Erfassungssystemen für Altgeräte abzustimmen (dazu unten unter 2.3.4).

2.3.3 Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle, die der AltfahrzeugV unterfallen

2.3.3.1 Demontagepflichten

Die Hersteller von Fahrzeugen sind verpflichtet, flächendeckend Rückgabemöglichkeiten durch anerkannte Rücknahmestellen oder von ihnen hierzu bestimmte anerkannte Demontagebetriebe zu schaffen,

§ 3 Abs. 1 AltfahrzeugV.

Nach § 5 Abs. 2 Satz 1 AltfahrzeugV müssen insbesondere Betreiber von Demontagebetrieben die für sie jeweils geltenden Anforderungen des Anhangs zur AltfahrzeugV erfüllen. Nach Nr. 3.2.3.3 des Anhangs zur AltfahrzeugV müssen Betreiber von Demontagebetrieben vor der Überlassung der Restkarosse an eine Schredderanlage oder eine sonstige Anlage zur weiteren Behandlung im Einzelnen aufgeführte Bauteile, Stoffe und Materialien entfernen und vorrangig der Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zuführen. Dazu gehören beispielsweise Katalysatoren, Auswuchtgewichte, Aluminiumfelgen und kupfer-, aluminium- und magnesiumhaltige Metallbauteile, wenn die entsprechenden Metalle nicht beim oder nach dem Schreddern getrennt werden,

vgl. zum Demontageprozess im Einzelnen Groke et al., in: Umweltbundesamt-Texte 02/2017, 2017, S. 129 ff.

Nr. 3.2.3.3 des Anhangs zur AltfahrzeugV setzt Art. 6 i. V. m. Anhang I Nr. 4 der Richtlinie über Altfahrzeuge 2000/53/EG („Altfahrzeug-Richtlinie“) um, der technische Mindestanforderungen für die Behandlung von Altfahrzeugen regelt. Auf europäischer Ebene können Pflichten zur Entfernung edel- und sondermetallhaltiger Bauteile in Anhang I Nr. 4 Altfahrzeug-Richtlinie eingefügt werden, die entsprechend im deutschen Recht umzusetzen wären.

Der EuGH hat bereits befunden, dass die Altfahrzeug-Richtlinie, die nach ihrem ersten Erwägungsgrund in erster Linie darauf abzielt, die Umweltbelastung durch Altfahrzeuge zu verringern, keine vollständige Harmonisierung vorsieht und die Mitgliedstaaten nicht daran hindert, verstärkte Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Es muss jedoch sichergestellt sein, dass solche Maßnahmen mit europäischem Recht vereinbar sind und nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen,

vgl. EuGH, Urteil vom 15.04.2010, C-64/09, juris Rdn. 35.

Daher kann auch der nationale Gesetzgeber tätig werden und – vorbehaltlich der Vereinbarkeit mit europäischem Recht – in Nr. 3.2.3.3 des Anhangs zur AltfahrzeugV zusätzlich eine Pflicht zur Entfernung der edel- und sondermetallhaltigen Metalle vor der Überlassung der Restkarosse an eine Schredderanlage sowie zur vorrangigen Zuführung zur Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung vorsehen.

2.3.3.2 Verwertungsquoten

§ 5 AltfahrzeugV, welcher der Umsetzung von Art. 7 Abs. 2 Altfahrzeug-Richtlinie dient, enthält Verwertungsquoten für Altfahrzeuge auf nationaler Ebene.

Nach § 5 Abs. 1 Nr. 2 AltfahrzeugV, der Art. 7 Abs. 2 Altfahrzeug-RL umsetzt, müssen die Wirtschaftsbeteiligten spätestens seit 01.01.2015 sicherstellen, dass bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeugleergewicht aller pro Jahr überlassenen Altfahrzeuge folgende Zielvorgaben erreicht werden:

- „a) Wiederverwendung und Verwertung mindestens 95 Gewichtsprozent,
- b) Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent.“

Nach § 5 Abs. 2 Satz 1 i. V. m. Anlage 3.2.4.1 der AltfahrzeugV müssen die Betreiber von Demontagebetrieben folgende Anforderungen erfüllen:

„Betreiber von Demontagebetrieben müssen vor der Überlassung der Restkarosse an eine Schredderanlage oder eine sonstige Anlage zur weiteren Behandlung spätestens ab dem 1. Januar 2006 Bauteile, Materialien und Betriebsflüssigkeiten mit einem Anteil von durchschnittlich mindestens 10 Gewichtsprozent im Jahresmittel bezogen auf die Summe der Fahrzeugleergewichte der angenommenen Altfahrzeuge ausbauen oder entfernen und der Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zuführen und belegen, dass der entsprechende Anteil stofflich verwertet wurde. Metallische Bauteile und Materialien, wie z. B. Restkarossen, Kernschrott, Ersatzteile, und Kraftstoffe dürfen bei der Berechnung nach Satz 6 nicht in Ansatz gebracht werden.“

Vgl. dazu Prella, ZUR 2010, 512 (514); vgl. BR-Drs. 1075/01 vom 21.12.2001, S. 57.

2.3.3.2.1 Verankerung zusätzlicher Verwertungsquoten und korrespondierender Mitteilungs- und Dokumentationspflichten

Sofern eine zusätzliche Verwertungsquote für ausgebaute edel- und sondermetallhaltige Bauteile gesetzlich geregelt werden soll, kann dies entweder auf EU-Ebene (Altfahrzeug-Richtlinie) oder auf deutscher Ebene (AltfahrzeugV) durch Ergänzung der bereits gesetzlich geregelten Verwertungsquoten um eine neue Verwertungsquote für edel- und sondermetallhaltige Bauteile erfolgen. Bei Verankerung

nationaler Quoten muss sichergestellt sein, dass solche Maßnahmen mit europäischem Recht vereinbar sind und nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen,

vgl. EuGH, Urteil vom 15.04.2010, C-64/09, juris Rdn. 35.

Eine solche Verankerung kann beispielsweise in Nr. 3.2 des Anhangs zur AltfahrzeugV geregelt werden.

Solche separaten Verwertungsquoten für Edel- und Sondermetalle sollten – den Ausführungen zum ElektroG entsprechend – von korrespondierenden Mitteilungs- und Dokumentationspflichten der Demontagebetriebe nach § 7 Abs. 1, Anhang Nr. 3.3 der AltfahrzeugV flankiert werden.

2.3.3.2.2 Möglichkeit der Einstufung der Zwischenlagerung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aus Altfahrzeugen als stoffliche Verwertung

Um die Erfüllung der erforderlichen Quoten sicherzustellen, muss genau definiert werden, welche Maßnahmen als stoffliche Verwertung anzusehen sind. § 2 Nr. 10 AltfahrzeugV definiert stoffliche Verwertung als

„die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke (Nutzung der stofflichen Eigenschaften, rohstoffliche Verwertung), jedoch mit Ausnahme der energetischen Verwertung.“

Mit der Definition der stofflichen Verwertung nach § 2 Nr. 10 AltfahrzeugV sollte die Begriffsbestimmung des Recyclings aus der Altfahrzeug-Richtlinie soweit wie möglich übernommen werden,

BR-Drucksache 1075/01 vom 21.12.2001, S. 48; vgl. Dageförde, in: von Lersner/Wendenburg/Versteyl (Hrsg.), Recht der Abfallbeseitigung, Kommentar, Stand: Oktober 2018, 0301 vor § 2 Rdn. 6; vgl. Bundesrat, Empfehlungen Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (federführend), Drucksache 1075/2/01 vom 19.02.2002.

Ein Gleichlauf mit der neuen Begriffsbestimmung der stofflichen Verwertung in der (durch die Richtlinie 2018/851/EU geänderten) EG-Abfallrahmenrichtlinie erfolgt hingegen nicht. Art. 15a Abfallrahmen-RL definiert stoffliche Verwertung nunmehr als

„jedes Verwertungsverfahren, ausgenommen die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die als Brennstoff oder anderes Mittel der Energieerzeugung verwendet werden sollen. Dazu zählen unter anderem die Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und Verfüllung.“

Art. 2 Nr. 7 Altfahrzeug-Richtlinie definiert „Recycling“ wie folgt:

„die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch mit Ausnahme der energetischen Verwertung. Unter energetischer Verwertung ist die Verwendung von brennbarem Abfall zur Energieerzeugung durch direkte Verbrennung mit oder ohne Abfall anderer Art, aber mit Rückgewinnung der Wärme zu verstehen.“

Da der Gesetzgeber keine Vorgaben für Dauer des Verwertungsprozesses festgelegt hat, ist eine Verwertung im Anschluss an die Entnahme aus dem Zwischenlager möglich. Die Zwischenlagerung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile selbst stellt jedoch noch keine Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck und damit jedenfalls keine stoffliche Verwertung im Sinne der AltfahrzeugV oder ein Recycling im Sinne der Altfahrzeug-Richtlinie dar. Auch hier ist daher ein Tätigwerden des europäischen Gesetzgebers erforderlich, wenn die Verwertungs-/Recyclingdefinition auch die Zwischenlagerung umfassen soll.

2.3.3.3 Kennzeichnung

Nach § 9 Abs. 1 AltfahrzeugV, der Art. 8 Abs. 1 Altfahrzeug-Richtlinie umgesetzt, sind die Hersteller von Fahrzeugen verpflichtet,

„in Absprache mit der Werkstoff- und Zulieferindustrie Kennzeichnungsnormen für Bauteile und Werkstoffe nach Festlegung durch die Europäische Kommission gemäß Artikel 8 Abs. 2 der Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge (Abl. EG Nr. L 269 S. 34) zu verwenden, um insbesondere die Identifizierung derjenigen Bauteile und Werkstoffe zu erleichtern, die wiederverwendet oder verwertet werden können.“

Sofern auch eine Kennzeichnung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erfolgen soll, könnte dies daher in einer Entscheidung der Europäischen Kommission festgelegt werden. Mit der Entscheidung 2003/138/EG der Kommission vom 27.02.2003 zur Festlegung von Kennzeichnungsnormen für Bauteile und Werkstoffe wurde bereits die Verwendung verschiedener ISO-Normen zur Kennzeichnung bestimmter Kunststoff- und Kautschuk-Bauteile geregelt. Eine vergleichbare Kommissionsentscheidung wurde für die Kennzeichnung von edel- oder sondermetallhaltigen Bauteilen noch nicht getroffen.

2.3.3.4 Demontagehinweise

Nach § 9 Abs. 2 und 3 AltfahrzeugV, der Art. 8 Abs. 3 Altfahrzeug-Richtlinie umgesetzt, gelten ferner folgende Pflichten der Hersteller zur Bereitstellung von Demontageinformationen:

„(2) Die Hersteller von Fahrzeugen sind verpflichtet, für jeden in Verkehr gebrachten neuen Fahrzeugtyp binnen sechs Monaten nach Inverkehrbringen den anerkannten Demontagebetrieben Demontageinformationen bereitzustellen. In diesen Informationen sind insbesondere im Hinblick auf die Erreichung der Ziele gemäß § 5 die einzelnen Fahrzeugbauteile und –werkstoffe sowie die Stellen aufzuführen, an denen sich gefährliche Stoffe im Fahrzeug befinden, soweit dies für die Demontagebetriebe zur Einhaltung der Anforderungen nach dieser Verordnung erforderlich ist.

(3) Unbeschadet der Wahrung der Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse sind die Hersteller von Fahrzeugbauteilen verpflichtet, den anerkannten Demontagebetrieben auf Anforderung angemessene Informationen zur Demontage, Lagerung und Prüfung von wiederverwendbaren Teilen zur Verfügung zu stellen.“

Zu den Demontageinformationen gehören alle Informationen, die zur sach- und umweltgerechten Behandlung eines Altfahrzeugs notwendig sind; sie werden den anerkannten Demontagebetrieben von den Herstellern von Fahrzeugen und Zulieferern in Form von Handbüchern oder elektronischen Medien (z. B. CD-ROM, Online-Dienste) zur Verfügung gestellt,

vgl. § 2 Nr. 20 AltfahrzeugV.

Nach der deutschen Definition des Herstellerbegriffs sind auch die Hersteller von Fahrzeugteilen und –werkstoffen zur Bereitstellung von Demontagehinweisen verpflichtet,

vgl. oben unter 2.3.3.2.

Zur Umsetzung dieser Verpflichtung wurde von der Automobilindustrie ein EDV-Informationssystem namens IDIS (*International Dismantling Information System*) geschaffen, das die von der Altfahrzeug-Richtlinie geforderten Informationen zur Demontage von bestimmten Bauteilen für viele Marken und Modelle in mehr als 20 Sprachen zur Verfügung stellt,

vgl. Dageförde, in: von Lersner/Wendenburg (Hrsg.), Recht der Abfallbeseitigung, Kommentar, Stand: Oktober 2018, 0301 § 9 Rdn. 5; vgl. Überblick über vertretene Hersteller unter <http://www.idis2.com/faqs.php#>; vgl. Groke et al. (Groke et al. 2017 ; S. 203 f.)

Soweit auf europäischer oder deutscher Ebene neue Anforderungen an die Entfernung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen von Altfahrzeugen im Rahmen der Demontage gesetzlich festgelegt werden sollten,

vgl. unter 2.3.3.1 zur Ergänzung der Nr. 3.2.3.3 Anhang AltfahrzeugV,

würde dies auch bedeuten, dass die Hersteller den Demontagebetrieben entsprechend ergänzte Demontagehinweise zur Verfügung stellen müssen, aus denen sich ergibt, wie diese edel- und sondermetallhaltigen Bauteile ausgebaut werden können.

2.3.4 Allgemeine abfallrechtliche Regelungen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle

Soweit keine spezialgesetzlichen Anforderungen gelten, wie z. B. für den Abbau von einzelnen Großwerkzeugen oder Großanlagen (wie z. B. Windkraftanlagen), die nicht in den Geltungsbereich des ElektroG fallen oder für die Verwertung von Schlämmen von Poliermitteln, greifen zunächst die allgemeinen abfallrechtlichen Regelungen ein.

Zu den allgemeinen abfallrechtlichen Pflichten gehören insbesondere die §§ 7 ff. KrWG, in denen der Umfang der Getrennthaltungs- und Verwertungspflichten der Abfallerzeuger und –besitzer geregelt ist. Nach der Abfallhierarchie des KrWG sind Erzeuger und Besitzer von Abfällen vorrangig zur Verwertung im Verhältnis zur Beseitigung verpflichtet,

§§ 7 Abs. 2, 6 Abs. 1 KrWG.

Dementsprechend sind auch edel- und sondermetallhaltige Bauteile aus Großwerkzeugen/Großanlagen oder aus sonstigen Bereichen zunächst ordnungsgemäß nach den Vorschriften des KrWG und weiteren öffentlich-rechtlichen Vorschriften schadlos zu verwerten (§ 7 Abs. 3 Satz 1 und 2 KrWG). Diese Verwertungspflicht unterliegt allerdings einer Verhältnismäßigkeitseinschränkung (§ 7 Abs. 4 KrWG). Danach sind Abfälle zu verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, insbesondere für den durch die Verwertung gewonnenen Stoff ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist erst dann nicht mehr gegeben, wenn die Verwertungskosten außer Verhältnis zu den Beseitigungskosten stehen (§ 7 Abs. 4 Satz 3 KrWG). Solange keine wirtschaftlich zumutbare Verwertungsmöglichkeit für die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle zur Verfügung steht, greifen stattdessen Pflichten zur ordnungsgemäßen Beseitigung (§ 15 KrWG).

Soweit es sich bei Großwerkzeugen oder Großanlagen mit NdFeB-magnethaltigen Bauteilen, die nicht dem ElektroG unterfallen, um Anlagen im Sinne des § 3 Nr. 5 Bundes-Immissionsschutzgesetzes handeln sollte, sind ferner die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen zu beachten,

vgl. § 13 KrWG, §§ 5 Abs. 3 Nr. 2, 22 Abs. 2 BImSchG.

Abfallrechtlich können sich zudem Pflichten aus der Gewerbeabfallverordnung („GewAbfV“) ergeben, welche unter anderem die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und Bau- und Abbruchabfällen regelt und beispielsweise gesonderte Getrennthaltungspflichten festlegt. Dabei ist im Einzelfall zu prüfen, inwieweit z. B. für Abfälle, die beim Abbau von einzelnen Großwerkzeugen oder Großanlagen anfallen, oder für Schlämme aus Poliermitteln der Anwendungsbereich der Gewerbeabfallverordnung eröffnet ist. Sollten diese Abfälle nicht stets eindeutig in den Geltungsbereich der GewAbfV fallen (wofür zumindest bei den Großwerkzeugen/Großanlagen Einiges spricht), ist zu erwägen, diese Abfallströme durch eine entsprechende Ergänzung der GewAbfV durch den Gesetzgeber ebenfalls in den Geltungsbereich der Gewerbeabfallverordnung aufzunehmen.

Sofern nicht nur Pflichten der Abfallbesitzer geregelt, sondern zusätzlich auch Regelungen zur Produktverantwortung von Herstellern getroffen werden sollen, wie z. B. für Hersteller von NdFeB-Magnet-haltigen Bauteilen oder Produkten (die nicht in den Anwendungsbereich des ElektroG oder der AltfahrzeugV fallen) oder für Hersteller von NdFeB-Magneten oder für Hersteller von cer- und lanthanhaltigen Poliermitteln, können diese Pflichten in einer separaten Rechtsverordnung – oder je nach Umfang – einem separaten Gesetz geregelt werden,

vgl. zur erweiterten Hersteller- und Produktverantwortung auch Art. 8 und Art. 8a AbfallRL, geändert bzw. eingefügt durch Richtlinie 2018/851/EG vom 30.05. 2018.

Dort könnten Pflichten zur Kennzeichnung, Erfassung, Rücknahme, Verwertung und Weitergabe von Demontagehinweisen geregelt werden. Als Ermächtigungsgrundlage für eine mögliche Rechtsverordnung kommt § 25 KrWG in Betracht, wobei die Details im Einzelnen näher zu prüfen sind. Bei einer solchen Rechtsverordnung und auch bei einem separaten Gesetz wäre insbesondere eine Verzahnung mit den Regelungen des ElektroG und der AltfahrzeugV erforderlich, soweit die NdFeB-Magnete (auch) in Elektroaltgeräten oder Altfahrzeugen enthalten sind, und aus dem Verwertungsprogramm der Hersteller dort ausgekoppelt werden sollen,

vgl. zu Verzahnung von BattG, ElektroG und AltfahrzeugV § 12 Abs. 1, 2 bzw. 4 BattG, § 20 Abs. 2 S. 2 i. V. m. Anhang 4 Nr. 1 b) ElektroG, § 5 Abs. 2 S. 1 i. V. m. Anhang Nr. 3.2.2.1 Spiegelstrich 1 AltfahrzeugV.

2.3.5 Regelungen zur Kennzeichnung und zu Demontagehinweise in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG

Ergänzend wird auf die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG hingewiesen. Auf der Grundlage der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG können Mindestanforderungen für die umweltgerechte Gestaltung (das Ökodesign) bestimmter energieverbrauchsrelevanter Produkte festgelegt werden. Dies geschieht für bestimmte Produktarten in europäischen Durchführungsmaßnahmen oder, soweit diese schneller oder kostengünstiger sind, in Selbstregulierungsinitiativen der Industrie. Im Fokus standen bislang in erster Linie Mindestanforderungen an die Energieeffizienz bestimmter Produkte,

vgl. Art. 15, Art. 17 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG; vgl. zu Selbstregulierungsmaßnahmen Erwägungsgrund 18, Art. 15 Abs. 3 lit. b, Anhang VIII der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG; Dietrich/Ackermann, ZUR 2013, 274 (274); Oehlmann/Herlédan, EurUP 2014, 204 (205); Prelle, AbfallR 2018, 106 (107).

Ziel der als Binnenmarktvorschrift nach Art. 95 EGV (jetzt Art. 114 AEUV) erlassenen Richtlinie ist die Harmonisierung der umweltbezogenen Produkthanforderungen. Jedenfalls nach Erlass von Durchführungsmaßnahmen für bestimmte Produktgruppen dürfte der nationale Gesetzgeber regelmäßig keinen eigenen Handlungsspielraum mehr für weitergehende nationale Maßnahmen besitzen,

vgl. Erwägungsgründe 1, 2 und 11 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG mit dem Hinweis auf Art. 95 EGV (nunmehr Art. 114 AEUV) und dem dort verankerten Letztentscheidungsrecht der Kommission über bestehende nationale Bestimmungen, die durch überragende Erfordernisse des Umweltschutzes gerechtfertigt sind, oder auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse gestützte nationale Bestimmungen zum Schutz der Umwelt aufgrund eines spezifischen Problems für diesen Mitgliedstaat, das sich nach dem Erlass der betreffenden Durchführungsmaßnahme ergibt.

Produkte, die erlassenen Durchführungsmaßnahmen nicht entsprechen, dürfen in Deutschland bzw. in der EU nicht vermarktet werden,

vgl. zur deutschen Umsetzung das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz.

2.3.5.1 Formelle Anforderungen an Durchführungsmaßnahmen

Zunächst legt die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG Verfahrensvorschriften für den Erlass von Durchführungsmaßnahmen fest,

vgl. dazu im Detail Oehlmann/Herlédan, EurUP 2014, 204 (208 ff.) .

In der sog. Ökodesign-Voruntersuchung wird zunächst geprüft, ob die Voraussetzungen zur Produktregulierung vorliegen, insbesondere, ob ein Produkt die folgenden Voraussetzungen erfüllt:

- „ a) Das Verkaufs- und Handelsvolumen des Produkts ist erheblich; als Richtwert dient dabei nach den neuesten vorliegenden Zahlen innerhalb eines Jahres in der Gemeinschaft eine Anzahl von mehr als 200 000 Stück;
- b) das Produkt muss angesichts der in Verkehr gebrachten und/oder in Betrieb genommenen Mengen eine erhebliche Umweltauswirkung in der Gemeinschaft gemäß den in dem Beschluss Nr. 1600/2002/EG festgelegten strategischen Prioritäten der Gemeinschaft haben und
- c) das Produkt muss ein erhebliches Potenzial für eine Verbesserung seiner Umweltverträglichkeit ohne übermäßig hohe Kosten bieten, wobei insbesondere berücksichtigt wird:
 - i) Fehlen anderer einschlägiger Gemeinschaftsvorschriften bzw. einer angemessenen Regelung des Problems durch die Marktkräfte und
 - ii) große Unterschiede bei der Umweltverträglichkeit der auf dem Markt verfügbaren Produkte mit gleichwertigen Funktionen.“

(Art. 15 Abs. 2 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG).

Ferner werden in dieser ersten Studie die Anforderungen des Art. 15 Abs. 3 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG geprüft. Dieser fordert:

- „ a) Es darf aus Sicht des Benutzers keine nennenswerten nachteiligen Auswirkungen auf die Funktionsweise des Produkts geben;
- b) Gesundheit, Sicherheit und Umwelt dürfen nicht beeinträchtigt werden;
- c) es darf keine nennenswerten nachteiligen Auswirkungen für die Verbraucher geben, insbesondere hinsichtlich der Erschwinglichkeit und der Lebenszykluskosten des Produkts;
- d) es darf keine nennenswerten nachteiligen Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie geben;
- e) eine spezifische Ökodesign-Anforderung darf grundsätzlich nicht dazu führen, dass die Technik eines bestimmten Herstellers von allen anderen Herstellern übernommen werden muss; und
- f) sie dürfen den Herstellern keine übermäßige administrative Belastung aufbürden.“

Ferner muss die Durchführbarkeit von Verbesserungen in Relation zu ihrer Bedeutung stehen, daher muss die Kommission bei der anschließenden Ausarbeitung eines Entwurfs einer Durchführungsmaßnahme wie folgt vorgehen:

- „a) Sie prüft den Lebenszyklus des Produkts sowie alle seine bedeutsamen Umweltaspekte, unter anderem die Energieeffizienz. Der Umfang der Untersuchung der Umweltaspekte und der Durchführbarkeit von deren Verbesserungen steht im Verhältnis zu ihrer Bedeutung. Die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an die bedeutenden Umweltaspekte eines Produkts darf nicht aufgrund einer Unsicherheit bei anderen Aspekten unangemessen verzögert werden;

- b) sie führt eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt, die Verbraucher und die Hersteller, einschließlich KMU, in Bezug auf Wettbewerbsfähigkeit (auch auf Märkten außerhalb der Gemeinschaft), Innovation, Marktzugang sowie Kosten und Nutzen durch;
 - c) sie trägt den von den Mitgliedstaaten für relevant erachteten nationalen Umweltvorschriften Rechnung;
 - d) sie führt eine geeignete Konsultation der Beteiligten durch;
 - e) sie erstellt auf der Grundlage der in Buchstabe b genannten Bewertung eine Begründung für den Entwurf der Durchführungsmaßnahme und
 - f) sie macht Terminvorgaben für die Durchführung, legt abgestufte Maßnahmen oder Übergangsmaßnahmen oder –zeiträume fest und berücksichtigt dabei insbesondere die möglichen Auswirkungen auf KMU oder auf spezifische, hauptsächlich von KMU hergestellte Produktgruppen.“
- (Art. 15 Abs. 4 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG, vgl. ferner Art. 15 Abs. 6, Anhang I für allgemeine Ökodesign-Anforderungen, Anhang II für spezifische Ökodesign-Anforderungen).

Nach der Anhörung der Konsultationsforen und nach dem erfolgreichen Durchlaufen des Komitologieverfahrens kann die Durchführungsmaßnahme im Amtsblatt verkündet werden. Zwischen Beginn einer Voruntersuchung und Veröffentlichung der Durchführungsmaßnahme soll die durchschnittliche Verfahrensdauer von 55 Monaten betragen,

vgl. Oehlmann/Herlédan, EurUP 2014, 204 (210).

2.3.5.2 Materielle Anforderungen an Durchführungsmaßnahmen

In den Durchführungsmaßnahmen müssen die erfassten Produktarten und Ökodesign-Anforderungen genau definiert werden,

vgl. Art. 15 Abs. 8 und im Detail Anhang VII der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.

Zu den zulässigen allgemeinen Ökodesign-Anforderungen für Produkte, welche in Durchführungsmaßnahmen festgelegt werden können, gehören unter anderem:

„Indikatoren der Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit: Zahl der verwendeten Materialien und Bauteile, Verwendung von Normteilen, Zeitaufwand für das Zerlegen, Komplexität der zum Zerlegen benötigten Werkzeuge, Verwendung von Kennzeichnungsnormen für wieder verwendbare und rezyklierbare Bauteile und Materialien (einschließlich der Kennzeichnung von Kunststoffteilen nach ISO-Norm), Verwendung leicht rezyklierbarer Materialien, leichte Zugänglichkeit von wertvollen und anderen rezyklierbaren Bauteilen und Materialien, leichte Zugänglichkeit von Bauteilen und Materialien, die gefährliche Stoffe enthalten“, Art. 15 Abs. 6, Anhang I Teil 1 Nr. 1.3 lit. b Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.

In den Durchführungsmaßnahmen kann ferner vorgeschrieben werden, dass der Hersteller Angaben zu machen hat, die den Umgang mit dem Produkt, seine Nutzung oder sein Recycling durch andere Stellen als den Hersteller beeinflussen können, wozu gegebenenfalls auch Informationen über Entsorgungsbetriebe zu Zerlegung, Recycling oder Deponierung des Altprodukts gehören können,

Art. 15 Abs. 6, Anhang I Teil 2 lit. d Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.

Ferner können für ausgewählte Produkteigenschaften mit erheblichen Umweltauswirkungen spezifische Ökodesign-Anforderungen in Durchführungsmaßnahmen festgelegt werden,

Art. 15 Abs. 6 Satz 2 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.

Möglich ist beispielsweise die Festlegung von spezifischen Ökodesign-Anforderungen für die reduzierte Verwendung eines bestimmten Materials,

„wie etwa der Begrenzung der Verwendung dieses Materials in den verschiedenen Stadien des Lebenszyklus des Produkts (z. B. Begrenzung des Wasserverbrauchs bei der Nutzung oder des Verbrauchs eines bestimmten Materials bei der Herstellung oder Mindestanforderungen für die Verwendung von Recyclingmaterial)“, Anhang II UAbs. 1 Satz 2 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG.

In vielen, bislang ergangenen Durchführungsmaßnahmen werden Pflichten der Hersteller zur Bereitstellung von Demontagehinweisen verankert,

vgl. z. B. Anhang I Nr. 2.1 lit. c Verordnung 641/2009/EG (Nassläufer-Umwälzpumpen), Anhang I Nr. 2 Satz 4 Nr. 11 Verordnung 640/2009/EG (Demontageinformationen für Elektromotoren).

Außerdem wurden Hersteller beispielsweise verpflichtet, Angaben über den Quecksilbergehalt zur Verfügung zu stellen,

vgl. z. B. Anhang II Nr. 7.1.1 lit. y Verordnung 617/2013/EU (unter anderem Angabe des Quecksilbergehalts in technischen Unterlagen und frei zugänglichen Websites für Desktop-Computer), Anhang I Nr. 6.1 lit. g, Nr. 2 Verordnung 2005/32/EG (Informationspflicht der Hersteller über Quecksilber- und Bleigehalt von Fernsehgeräten); Informationspflichten gegenüber dem Endnutzer über den Quecksilbergehalt sieht die Verordnung 244/2009/EG (Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht) vor. Dieser ist auf der Verpackung vor dem Kauf sichtbar anzugeben und auf frei zugänglichen Internetseiten bereitzustellen, Anhang II Nr. 3.1 der Verordnung 244/2009/EG.

Zwar dient die Ökodesign-Richtlinie – neben der Binnenmarktharmonisierung - vorrangig der Erhöhung der Energieeffizienz, daneben wird jedoch auch die Ressourceneffizienz mehrfach in den Erwägungsgründen genannt, so dass Durchführungsmaßnahmen auch zur Steigerung der Ressourceneffizienz denkbar und von der Europäischen Kommission geplant sind,

vgl. Art. 1 Abs. 2, Erwägungsgründe 3, 10, 13 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG; vgl. auch Europäische Kommission COM (2016) 773 final, S. 8 ff.

Demzufolge wäre es grundsätzlich denkbar, auf europäischer Ebene in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG Anforderungen an die Kennzeichnung und an die Erstellung von Demontagehinweisen für bestimmte edel- und sondermetallhaltige Produktgruppen festzulegen, welche die Verwertung von Edel- und Sondermetall fördern. Auch auf die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG gestützte Kennzeichnungspflichten und Pflichten zur Bereitstellung von Demontagehinweisen in Durchführungsmaßnahmen für edel- und sondermetallhaltige Produkte müssten neben den Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG, insbesondere des Art. 15 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG, den Anforderungen des (europäischen) Verhältnismäßigkeitsprinzips genügen,

vgl. dazu bereits unter 2.3.2.5 und 2.3.2.6.

Insbesondere ist bei Erlass etwaiger Durchführungsmaßnahmen eine sorgfältige Prüfung der Reichweite der abfallrechtlichen Pflichten, insbesondere nach der WEEE-Richtlinie, durchzuführen, um zu bestimmen, welche abfallwirtschaftlichen Ökodesign-Anforderungen in Durchführungsmaßnahmen zusätzlich erforderlich sein können.

Vor dem Hintergrund der bislang fehlenden Abstimmung der WEEE-Richtlinie mit der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG und der daraus resultierenden Probleme bei der Festlegung abfallwirtschaftlicher Vorgaben für die Produktgestaltung wurde weitergehend bereits gefordert, bei der zukünftigen

Fortentwicklung von WEEE-RL und Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG das Verhältnis der beiden Regelwerke zueinander (auf europäischer Ebene) besser zu regeln,

vgl. Oehlmann/Herlédan, EurUP 2014, 204 (213).

2.3.6 Zusammenfassung der rechtlichen Aspekte zu den Ausbaupflichten, der Sicherstellung von Verwertungsquoten, den Kennzeichnungspflichten und der Pflicht zur Bereitstellung von Demontagehinweisen für edel- und sondermetallhaltige Abfallströme

Separationspflichten sowie ergänzende Verwertungspflichten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile von Elektroaltgeräten oder von Altfahrzeugen können und müssten gesetzlich auf nationaler und/oder europäischer Ebene geregelt werden. Die entsprechenden Regelwerke zu Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen bieten die Möglichkeit der Ergänzung von Verwertungsquoten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile, die von den Herstellern und/oder den Erstbehandlungsanlagen/Demontagebetrieben erreicht werden müssten. Ferner wäre im Rahmen des ElektroG die Regelung von Ausbau- und Verwertungspflichten denkbar, die nur für einen Magnettypen (NdFeB) gelten.

Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass die Zwischenlagerung der sonder- oder edelmetallhaltigen Bauteile nicht als Teil der Verwertung eingestuft und bei den Verwertungsquoten nach dem ElektroG mitberücksichtigt werden kann. Dies ergibt sich aus dem eindeutigen Wortlaut und der Entstehungsgeschichte von § 22 ElektroG und Art. 11 Abs. 2 UAbs. 2 WEEE-RL. Da bislang in der Regel keine separate Verwertung der hier betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Bauteile erfolgt und nach unserer Kenntnis trotzdem die erforderlichen Verwertungsquoten erreicht werden, ist es möglich, dass eine Separation und evtl. anschließende Zwischenlagerung von einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen in der Praxis nicht zu Problemen beim Erreichen der Verwertungsquote führt. Zeitliche gesetzliche Vorgaben, wann die Verwertung beendet sein muss, gibt es nicht. Insofern kann eine Verwertung, die im Anschluss an die Zwischenlagerung durchgeführt wird, bei den Verwertungsquoten berücksichtigt werden.

Falls aber das Erreichen der Verwertungsquote aufgrund der Zwischenlagerung einzelner Bauteile oder Gruppen von Bauteilen in der Praxis problematisch werden sollte, wäre eine Änderung des ElektroG dahingehend erforderlich, bereits die Zwischenlagerung, zumindest die von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen, ausnahmsweise als (ggf. vorläufige) Verwertung einzustufen. Einer solchen Gesetzesänderung auf nationaler Ebene stehen allerdings die Vorgaben der WEEE-RL entgegen, welche die Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Sofern eine Änderung der Verwertungsdefinition angestrebt wird, wäre daher auch der europäische und nicht allein der nationale Gesetzgeber gefragt. Auch die Regelung von Kennzeichnungspflichten für edel- oder sondermetallhaltige Bauteile ist in Ergänzung der bestehenden Kennzeichnungspflichten möglich, müsste jedoch jeweils verhältnismäßig sein.

Sofern Ausbaupflichten für edel- und sondermetallhaltige Bauteile aus Elektroaltgeräten oder aus Altfahrzeugen gesetzlich geregelt werden sollten, führt dies auch zur Erweiterung der gesetzlich erforderlichen Demontagehinweise der Hersteller von Elektrogeräten und Fahrzeugen, ohne dass dies einer weiteren gesetzlichen Präzisierung bedarf. Für Altfahrzeuge gibt es bereits eine Zentraldatenbank mit umfangreichen Demontagehinweisen IDIS. Soweit eine solche zentrale Datenbank für Elektroaltgeräte geschaffen werden soll, wären je nach Ausgestaltung entweder freiwillige Vereinbarungen der Hersteller oder gesetzliche Regelungen erforderlich.

Ferner wäre es grundsätzlich denkbar, auf europäischer Ebene in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG Anforderungen an die Kennzeichnung für bestimmte edel- oder sondermetallhaltige Produktgruppen festzulegen. Auf die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG gestützte Kennzeichnungspflichten und Pflichten zur Bereitstellung von Demontagehinweisen in Durchführungsmaßnahmen müssten alle Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG, ins-

besondere des Art. 15 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG, erfüllen als auch dem Verhältnismäßigkeitsprinzip genügen. Insbesondere ist bei Erlass etwaiger Durchführungsmaßnahmen eine sorgfältige Prüfung der Reichweite der abfallrechtlichen Pflichten, insbesondere nach der WEEE-Richtlinie, durchzuführen, um zu bestimmen, welche abfallwirtschaftlichen Ökodesign-Anforderungen zusätzlich erforderlich sind.

Sofern in Vorschriften zur Produktverantwortung, wie z. B. der WEEE-RL und dem ElektroG, zukünftig die Verwertung von Edel- und Sondermetallen gefordert wird, wird aufgrund der fehlenden derzeitigen Verwertungsmöglichkeiten zumindest für einige Edel- und Sondermetalle, eine Zwischenlagerung erforderlich sein,

vgl. zu rechtlichen Aspekten der Zwischenlagerung unter 3.4.

2.4 Die edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme: Verwertungsprozesse, Bündelungs- und Informationskonzepte

2.4.1 Vorbemerkung

Technische Recyclingprozesse für edel- und sondermetallhaltige Abfallströme wurden und werden in verschiedenen Forschungsprojekten, teils sehr differenziert, erarbeitet. Allerdings fügt sich daraus nur selten ein Gesamtbild, da diese Prozessketten allenfalls für einzelne Abfallströme und größere Teile der erforderlichen Gesamtkette von der ersten Behandlungsstufe bis zur Herstellung (künftig) marktfähiger Produkte hinreichend konkret konzipiert sind. Zudem gehen die Vorhaben von teils sehr unterschiedlichen Randbedingungen aus. Dies ist auch nicht anders zu erwarten.

Die Entwicklung von Bündelungs- und Logistikkonzepten ist aber ohne definierte Verwertungspfade und Geschäftsmodelle nur eingeschränkt möglich. So müssen vor der Definition von Logistikketten die logistikkritischen Aspekte des technischen Gesamtprozesses geklärt sein (z.B. was soll in welcher Form von wem an wen geliefert werden). Diese hängen wiederum von den Geschäftsmodellen der Akteure ab.

Letztlich wäre es allerdings auch gar nicht zweckmäßig, aus der übergeordneten Perspektive dieses Vorhabens mit einem geschlossenen Modell die Realität vorwegnehmen zu wollen, die sowohl im Falle primär marktgetriebener wie auch im Falle primär regulatorisch getriebener Ansätze von den beteiligten Akteuren ausgehandelt und geschaffen werden muss.

Wenn auf mittel- bis langfristige Sicht eine stärkere Bündelung edel- und sondermetallhaltiger Abfallströme stattfindet, dann wird deren Ausgestaltung von einer Vielzahl an Akteuren und Einflussfaktoren bestimmt werden, die sich zudem selbst wandeln. Änderungen etwa im Bereich der Produkt-, Rohstoff- und Sekundärrohstoffmärkte, technologische Innovationen mit Auswirkungen auf Produktgestaltung, Fertigungsprozesse und Verwertungsprozesse oder Änderungen des rechtlichen Rahmens definieren ein variables Handlungsfeld, in dem sich die Akteure mit ihren sich verändernden Interessenlagen und Handlungsmöglichkeiten und ihrer Kreativität verhalten und immerfort neue Realitäten in ihren Geschäftsbeziehungen, sowie Konkurrenz- und Kooperationsmustern schaffen.

Eine Vorausschau auf mögliche Ausgestaltungen dieses Geschehens in Form einer vertieften Szenarioanalyse ist grundsätzlich möglich, im Rahmen dieses Vorhabens aber nicht vorgesehen. Aus heutiger Sicht können nur Prinzipszenarien skizziert werden, die mögliche Ausgangspunkte für die Realisierung einer Bündelung der untersuchten edel- und sondermetallhaltigen Abfälle bieten mögen.

Was aber könnte den Aufbau von Recyclinglösungen vorantreiben?

Höhere Rohstoffpreise als Treiber des Aufbaus von Bündelungssystemen dürften kein realistischer Ansatz sein. Von einem nicht nur eher kurzzeitigen knappheitsbedingten Anstieg von Rohstoffpreisen kann aufgrund historischer Daten auf absehbare Zeit kaum ausgegangen werden.³¹ Denkbar wäre eine künstliche Anhebung von Rohstoffpreisen etwa durch eine Rohstoffsteuer, die allerdings auf breiter Basis international vereinbart werden müsste. Auch hierzu ist derzeit kaum eine Basis in Sicht.

Eine Integration in bestehende Logistik- und Verwertungsprozesse ist grundsätzlich erforderlich und sie kann insbesondere die Erfassung kleinerer Einzelmengen ermöglichen. So könnten Betreiber bestehender Erfassungs- und Sammelsysteme bei wirtschaftlich relevanten Umfängen Interesse an einer Ausweitung ihrer Aktivitäten haben. Mindestens ist eine möglichst weitgehende Anbindung an bestehende Prozesse zu empfehlen, um zusätzlichen Aufwand in den wirtschaftlich ohnehin kritischen Prozessketten zu vermeiden.

³¹ S. hierzu z.B. zahlreiche historische Preisverläufe in Bräuninger et al. 2013

Eine branchenweite Selbstverpflichtung von Herstellern zu Finanzierung und Aufbau eines Bündelungssystems erscheint weniger wahrscheinlich, wenngleich auch solche Systeme bestehen. So holt etwa die PDR Recycling GmbH + Co KG im Auftrag von Bauschaumdosenherstellern entleerte Dosen vom Markt zurück und führt sie einer Verwertung zu. Dennoch sind eher Aktivitäten einzelner Hersteller oder Kooperationen weniger Hersteller zu erwarten, die sich um eine gezielte Erfassung und Verwertung ihrer Produkte bemühen. Auch hier kommt es zu einer Bündelung, allerdings in recht begrenzten Segmenten.

Durch regulatorische Maßnahmen können die Akteure zu Aktivitäten veranlasst werden, die sie aus eigenem (betriebswirtschaftlichem) Antrieb nicht ergreifen würden. Allerdings haben regulatorische Ansätze Wirkungsschwächen. Insbesondere komplexe Rechtsregeln haben mit Blick auf das Ziel, Verwertungsprozesse zu initiieren grundsätzlich mehrere Nachteile:

- Durch Überwachungs-, Kontroll- und Dokumentationsprozesse steigt der Aufwand für alle Beteiligten.
- Regulatorische Maßnahmen mobilisieren bei Verpflichteten Ausweichbewegungen, die sehr schwer vorhersehbar sind.
- Vorgaben schränken den Handlungsspielraum der Akteure ein, was den Aufbau kreativer und effizienter Lösungen behindern kann.
- Regulatorische Maßnahmen mit quantitativen Zielen können qualitätsorientierte Verwertungsprozesse behindern. Würde etwa eine Verwertungspflicht für alle ausgebauten NdFeB-Magnete gelten, so müssten auch minderwertige ggfs. stärker verunreinigte Magnete verwertet werden. Die Qualität der separierten Mengen nimmt dadurch insgesamt ab. Dies kann Akteure auf den Plan rufen, die mit minimalem Aufwand Scheinverwertungsprozesse betreiben. Gleichzeitig können Verwertern, die ihr Geschäft mit höherwertigen Magneten aufbauen, die ihnen und den Demontagebetrieben eine angemessene Vergütung ermöglichen, so gerade die interessantesten Stoffströme verloren gehen.

Ansätze mit breiterer Bündelungswirksamkeit könnten somit vor allem durch zwei Faktoren getrieben werden:

- Ein oder mehrere Verwerter gehen finanziell in Vorleistung und bündeln so große Mengen der Abfallströme, dass für sie ein wirtschaftliches Recycling möglich wird. Dabei schaffen sie ein Vertrags- und Kooperationsgefüge mit anderen Unternehmen.
- Durch gesetzliche Verpflichtung werden Akteure zur Umsetzung von Bündelungs- und Verwertungssystemen gezwungen.

Dabei ist davon auszugehen, dass diese Faktoren nicht idealtypisch wirken. So gibt es bereits heute Unternehmen, die sich mit Erfassung und Verwertung der Abfallströme befassen und die voraussichtlich auch im Falle einer gesetzlichen Vorgabe in diesem Feld aktiv bleiben werden. Auf der anderen Seite besteht durchaus die Möglichkeit, bestehende oder geplante Aktivitäten z.B. von Verwertern durch gezielte Förderung oder auch durch eher behutsame gesetzliche Maßnahmen zu unterstützen.

Welcher dieser Ansätze oder ggfs. welche Kombinationen mehrerer Ansätze für die zu analysierenden Abfallströme zielführend sein könnte und ob eine solche Bündelungswirkung überhaupt realistisch und angemessen erscheint, wird im Folgenden für die ausgewählten Abfallströme analysiert.

Bei allen dabei vorgestellten logistischen Bewertungen von Stoffströmen wird im ersten Ansatz vereinfachend

- A) von 100% der erfassten Menge ausgegangen, d.h. alle in Verkehr gebrachten Wertstoffe laufen auch auf dem dafür vorgesehenen Weg ins System zurück und

- B) von 100% der Neuwarenwerte für die Zielmetalle (Durchschnitt der Metallpreise über einen Zeitraum von fünf Jahren).

Beide Annahmen markieren realistisch nicht erreichbare obere Werte, die als Orientierungsrahmen dienen, ob wirtschaftliche Lösungen denkbar sein können. Bei den Mengen liegen die tatsächlich erfassten Anteile ohne rigide rechtliche Vorgaben in aller Regel weit unter 100%. Die tatsächlich erzielbaren Erlöse aus der Verwertung liegen meist deutlich unter den Neuwarenwerten. Es gibt allerdings auch gegenläufige Effekte, etwa durch größere in Verkehr gebrachte Produktmengen oder zeitweise wesentlich höhere Rohstoffpreise. Vor allem aber muss bei fehlender gesetzlicher Regulierung mit den in den Abfällen enthaltenen Zielmetallwerten im Falle einer wirtschaftlich tragfähigen Lösung die gesamte Verwertungskette finanziert werden, also nicht nur z.B. der Aufwand des Demontagebetriebs. Im Falle einer durch rechtliche Vorgaben getriebenen, aus sich heraus nicht wirtschaftlichen Lösung ist die Finanzierung der Verwertungskette zu klären. Und schließlich gehen in jeder Verwertungskette Zielmetallmengen verloren, es kommt also nie zu Ausbeuten von 100%.

Grundsätzlich wird für alle Handlungsempfehlungen die enge Kooperation mit Akteuren empfohlen, die heute bereits am entsprechenden Wertstrom beteiligt sind. Ziel muss sein, bereits heute aktiven Recyclingunternehmen die Möglichkeit zu geben, weitere Stoffströme abzuwickeln und noch mehr Wertstoffe zurück zu gewinnen. Also müssen bereits aktive Unternehmen eher entlastet und unterstützt werden und rechtliche Aktivitäten sollten darauf abzielen, neue Akteure für das Recycling zu gewinnen.

2.4.2 Abfallstromübergreifende Empfehlungen zu Informationsverarbeitung und -bereitstellung

Zur Informationsverarbeitung und -bereitstellung werden folgende stoffstromübergreifende Handlungsempfehlungen gegeben:

2.4.2.1 Recycling-Warenwirtschaftssystem (RWWS)

Ein konkreter Handlungsvorschlag für alle Wertstoffströme ist die Etablierung einer Datenbasis zur besseren Steuerung der Wertstoffströme. Hilfreich ist es, die Entwicklung und Einführung eines softwaregestützten Systems zu unterstützen, das im Sinne eines Warenwirtschaftssystems (Arbeitstitel: Recycling-Warenwirtschaftssystem: RWWS) die Möglichkeit gibt, eingehende entsorgte Objekte informatorisch zu erfassen.³²

Mit Recycling-Warenwirtschaftssystemen lässt sich eine Vielzahl von betrieblichen Informationen zu den ein- und ausgehenden Objekten (Abfällen und Wertstoffen) wie auch zu Kunden, Lieferanten etc. strukturiert erfassen und verwalten. Dies kann ggfs. auch zur unternehmensübergreifenden Koordination und Prozessoptimierung genutzt werden. Auch zur Erfüllung rechtlicher Informationspflichten können die Informationen genutzt werden. In der Regel ergibt sich der Nutzen eines Recycling-Warenwirtschaftssystems aus seiner Gesamtheit von Optionen. Die Verwaltung und Nutzbarmachung von Informationen zu edel- und sondermetallhaltigen Abfallströmen wird ein Teilaspekt bei solch einer betrieblichen Gesamtentscheidung sein (siehe Kapitel 2.4.2.5).

Recycling-Warenwirtschaftssysteme können auch Möglichkeiten in der zwischenbetrieblichen Kommunikation eröffnen, und so z.B. eine effizientere Gestaltung der Abhollogistik unterstützen.

³² Z.B. im Recycling von Altfahrzeugen gibt es ähnliche Ansätze bereits, die die hier dargestellten Anforderungen aber nur teilweise abdecken. Für andere Abfallströme müssten solche Systeme noch entwickelt und etabliert werden. Auch bei bereits bestehenden Lösungen werden aber die in ILESA fokussierten Inhaltsstoffe nicht explizit erfasst.

Die Plattform sollte auch die Möglichkeit geben, Herstellerinformationen zur Zusammensetzung von Objekten (stofflich und im Zusammenbau) mit den angenommenen Objekten zu verknüpfen. Um dies zu realisieren, müsste eine Online-Schnittstelle geschaffen werden, über die Hersteller ihre Informationen zu Produkten bereitstellen können. Im Rahmen der Anforderungsanalyse sind jeweils die abfallstromspezifischen Basisanforderungen an Herstellerinformationen zu definieren. Beispielsweise über Chargennummern können die erfassten Produkte mit diesen Informationen verkoppelt werden. Ggf. ist auch die Nutzung eines alternativen Nummernsystems nötig. Dabei sollten auch andere Quellen für solche Informationen (freie Plattformen) zugänglich gemacht werden. Weitere Anforderungen sind aus der Praxis heraus in einer Anforderungsanalyse zu erarbeiten.

Anvisierter Nutzen:

- Digitalisierung der Recycling-Kette/Digitalisierung von Sammel-/Behandlungsstellen,
- verbesserte Datenbasis für eine unternehmensinterne und ggf. kettenübergreifende Prozesssteuerung und Abhollogistik,
- Bereitstellung von Vergangenheitsdaten für zukünftige Prognosen und
- Erstellung einer Datenbasis für neue zukünftige Geschäftsmodelle.

Im ersten Schritt bezieht sich der Nutzen des RWWS auf die verbesserte Steuerung der Ablauforganisation innerhalb der Stufen (unternehmensintern) einer Recyclingkette (vgl. generisches Modell Abbildung 5). Das RWWS gibt die Möglichkeit, insbesondere Bewegungs- und Mengendaten zu sammeln. Basierend auf diesen Daten können Prozesse nachträglich bewertet und iterative effizienter geplant und gesteuert werden. Damit eignet sich das System für alle Recyclingketten, die heute nicht ausreichend digitalisiert sind. Sind solche Systeme etabliert, dann besteht die Möglichkeit, diese zu koppeln und unternehmensübergreifend bzw. kettenübergreifend Prozesse datenbasiert effizienter zu gestalten, u.a. bei der Tourenplanung.

Das RWWS liefert die Möglichkeit, Informationen zur Zusammensetzung bezogen auf den jeweiligen Stoffstrom abzulegen und über die Verwertungskette hinweg zu nutzen. Dies wird sich für Stoffströme auf den Verwertungsstufen durchsetzen, wo Informationen die effiziente Verwertung signifikant steigern und relativ einfach verfügbar gemacht werden können.

2.4.2.2 Füllstandserfassung

Die Füllstandserfassung bietet – wie in 2.2.4.1.2 erläutert – die Möglichkeit, dass Transportnetze und die sie betreibenden Dienstleister darüber Gestaltung und Auslastung der Touren optimieren können.

Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Füllstandserfassung, die auch von den gemessenen Waren und Wertstoffen abhängig sind. Zudem sind unterschiedliche Automatisierungsgrade denkbar. Folgende Varianten scheinen grundsätzlich plausibel für die Behälter für edel- und sondermetallhaltige Abfälle und könnten vorangetrieben werden:

- Erfassung über Barcodescannung wobei der Barcode einen bestimmten Füllstand (50%, 75%, 95%;...) repräsentiert und der Mitarbeiter keine Zahl eingeben muss.
- Erfassung über eine mobile Applikation und eine mobiles Gerät (Smartphone, Tablet, etc.) durch ein vorgefertigtes Menü (50%, 75%, 95%;...).
- Einsatz von Sensorik (Erfassen über Gewicht, über Helligkeit im Container, über Druck an Containerwänden, etc.).

Allen Varianten ist gemein, dass die Informationen dezentral am Sammelort direkt erfasst und über WLAN gemeldet werden. Dafür benötigen Sammelstellen (Erstbehandler, Demontagebetriebe) eine entsprechende Infrastruktur. D.h. alle Sammelstellen sollten vollständig mit WLAN abgedeckt werden

und einen leistungsfähigen Internetzugang erhalten. Aktivitäten hierfür decken sich mit dem Breitbandausbau, welcher ergänzt werden kann um die Abdeckung oftmals am Ortsrand liegender Sammelstellen mit (öffentlichem) WLAN.

Da Sammelstellen Startpunkte unterschiedlicher Wertstoffströme darstellen, besteht die Gefahr, dass individuelle Lösungen entstehen und in den Sammelstellen mit unterschiedlichen Lösungen gearbeitet werden soll. Daher sollte zur Erfassung eine standardisierte Lösung vorangetrieben werden, um die Nutzung zu sichern. Dies gilt insbesondere, wenn zumindest zum Teil manuelle Prozessbestandteile nötig sind. Also die Erfassung per Applikation ODER Barcode sowie die Meldung von Füllständen an eine Website oder die Integration der Füllstanderfassung in das oben angesprochene RWWS.

Konkrete Handlungsempfehlung ist, die Arbeiten zum RWWS mit denjenigen an der Füllstandmessung zu verkoppeln. Betroffen sind die gleichen Akteure, die letztlich einschätzen müssen, welche Messungsart in deren jeweiligem Bereich sinnvoll und umsetzbar ist. Im zweiten Schritt sollte der Informationsbedarf der Abnehmer abgefragt und in die Applikationen eingearbeitet werden. Sowohl die Frage der Realisierung von Füllstandmessungen als auch die der Ausgestaltung eines RWWS sollte allerdings nicht nur mit Blick auf die hier relevanten edel- und sondermetallhaltigen Abfälle sondern als möglicher Beitrag zur generellen Weiterentwicklung der Praxis in den Unternehmen analysiert und bewertet werden. Eine Füllstandmessung ist besonders für Systeme relevant, in welchen Dienstleister oder unternehmenseigene Fuhrparks in regelmäßigen Touren bestimmte Destinationen mit Sammelbehältern anfahren. Besonders großes Potenzial ist in Recyclingketten zu erwarten, die stochastische Aufkommen haben und mit einer relativ großen Anzahl Sammelbehältern arbeiten. Die Unplanbarkeit der stochastischen Aufkommen kann durch die Füllstandmessung kompensiert werden.

2.4.2.3 Stoffstromübergreifende Bündelung

Neben der Bündelung von gleichartigen Abfällen aus verschiedenen Anfallstellen und ggf. aus unterschiedlichen Branchen zum Zweck der effizienten Gestaltung der Logistikprozesse kommt auch eine abfallstromübergreifende Bündelung in Frage. Zur stoffstromübergreifenden Bündelung werden folgende Handlungsempfehlungen gegeben:

Grundsätzlich existieren zwei Bündelungsmöglichkeiten:

- die rein logistische Bündelung von unterschiedlichen Stoff-/Abfallströmen aus einer Anfallstelle
- und die Bündelung von Abfällen mit gemeinsamen Zielmetallen bzw. mit einem gemeinsamen Aufbereitungsverfahren.

Zudem ist eine Kombination der Bündelungslösungen möglich, dies erfordert aber einen zusätzlichen Sortierungsprozess.

Tabelle 29 stellt die potenziell denkbaren stoffstromübergreifenden Bündelungsoptionen für die betrachteten edel- und sondermetallhaltigen Abfälle ausgehend von der Anfallstelle zusammen. Das Potenzial ergibt sich durch die gleichzeitige Abholung und den gebündelten Transport aus einer Sammelstelle. Gebündelt wird also in Tabelle 29 nach Spalte 1 „Sammelstelle“. Begrenzt werden Bündelungspotenziale grundsätzlich durch die Kapazität der Transportmittel, sicherheitstechnische Kombinationsfähigkeit der zu transportierenden Objekte und rechtliche Rahmenbedingungen.

Tabelle 29: Bündelungspotenziale der einzelnen edel- und sondermetallhaltigen Stoffströme nach Sammelstellen

Sammelstelle (Bündelung aus ...)	Folgendes Aufbereitungsverfahren	Abfallstrom	Zielmetalle
Altfahrzeugdemonstergetrieb	Elektroaltgeräteaufbereitung	Fahrzeugelektronik	Ag, Au, Pd, Pt
		Fahrzeugsensorik (Lambda-Sonde und Zündkerzen)	Pt
	Magnetanaufbereitung	Elektromotoren aus Elektrofahrzeugen (Antrieb)	Nd, Dy, Pr, u.a.
		Kleine Elektromotoren aus Pkw	Nd, Dy, Pr, u.a.
Katalysatoranaufbereitung	Autokatalysator	Ce, La, Pd, Pt	
Fahrradsammelstelle / Erstbehandler für Elektroaltgeräte	Magnetanaufbereitung	Elektromotoren aus Elektrofahrzeugern	Nd, Dy, Pr, u.a.
		Magnete aus Nabendynamos	Nd, Dy, Pr, u.a.
Erstbehandler für Elektroaltgeräte	Magnetanaufbereitung	Festplatten	Nd, Dy, Pr, u.a.
		Kopfhörer / Lautsprecher	Nd, Dy, Pr, u.a.
		Magnete aus Raumklimaanlagen	Nd, Dy, Pr, u.a.
		Magnete aus medizinischen Geräten (z.B. MRT)	Nd, Dy, Pr, u.a.
	Aufbereitung für indiumreiche Glasfraktion	LCD-Anzeigen	In
	Altlampen-/ Leuchtstoffaufbereitung	Leuchtstoffe z. B. Leuchtstoffröhren	Y, Eu u.a.
Tantal-Recycling	Tantalkondensatoren	Ta	
Altlampenaufbereitung	Leuchtstoffaufbereitung	Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen	Y, Eu u.a.
Fachbetrieb, Erstbehandler für Elektroaltgeräte	Magnetanaufbereitung	Indusriemotoren	Nd, Dy, Pr, u.a.
Raffinerien	Katalysatoranaufbereitung	FCC-Katalysator	Ce, La
Industriespezifische Anfallstellen	Katalysatoranaufbereitung	Umweltkatalysator	Pt
Optische Industrie	Schleif- / Poliermittelaufbereitung	Poliermittel	Ce, La

Bündelung zielt auf die Auslastung der logistischen Ketten insbesondere bei Transporten ab. Daher ist die logistische Bündelung weitgehend unabhängig von den Inhaltsstoffen der transportierten Objekte. Die Bündelungspotenziale ergeben sich über die räumliche Nähe von Abholadresse und Anlieferadresse. Es ist Bündelung denkbar, die mehrere Objekte aus einer Quelle abholt (wie in Tabelle 29 angedeutet), oder auch Bündelung, die Objekte an einer Zieldestination abliefert. Beide Bündelungsoptionen lassen sich realisieren, wenn dazwischen eine Sortierung der transportierten Objekte erfolgt (vgl. in Abbildung 7).

Bündelung ist nur dort ratsam, wo aufgrund der Objektbeschaffenheit mit unausgelasteten Transportmitteln zumindest theoretisch gerechnet werden kann und auch andere Objekte ohne zusätzliche Anfahrten (also in räumlicher Nähe) transportiert werden können.

In Tabelle 29 sind mehrere Bündelungspotenziale ausgehend von den Sammelstellen dargestellt. Diese bilden eine Diskussionsgrundlage für Bemühungen in Richtung einer logistischen Bündelung z.B. über Workshops (vgl. 2.4.2.4).

2.4.2.4 Bündelungs-Workshops

Ein weiterer übergeordneter Handlungsvorschlag ist es, alle Abnehmer der gleichen Sammelstellen in Bündelungs-Workshops zusammen zu bringen, um die logistischen Netzwerke abzugleichen und mögliche Bündelungseffekte zu prüfen. Geeignet wären Workshops, die etwa durch das UBA in Abstimmung mit den jeweiligen Verbänden organisiert und durchgeführt werden. Dem zu Grunde liegt die Vermutung, dass bei einem „Übereinanderlegen“ der bestehenden logistischen Netze Redundanzen aufgedeckt werden können. Hier ließen sich evtl. auch Transporte geringer Mengen einarbeiten. Dabei ist die Bündelung in einem Transport nicht rohstoffabhängig, sondern abhängig von der Verfügbarkeit von Laderaum und von der Kompatibilität der Behältnissysteme in einem Transport.

Die Konkretisierung im Detail kann erst im Rahmen der Workshops erfolgen. Inwiefern sich Abfallströme aus rechtlichen oder technischen Gesichtspunkten gemeinsam transportieren lassen, muss dann im Detail geprüft werden.

Anvisierter Nutzen:

- Aufdecken von Synergien zwischen heute bereits etablierten Transportnetzen,
- Aufdecken von Potenzialen für Nutzung bereits bestehender Transportnetze für neue Wertstoffbewegungen (Zuladung) und
- Aufdecken von Kooperationsmöglichkeiten in der Logistik heutiger Systeme.

Kritisch ist dabei, dass die Abnehmer grundsätzlich Interesse an einer übergreifenden Kooperation und Koordination des Logistikdienstleister-Einsatzes haben müssen. Die Logistikdienstleister müssten dann die zusammengefassten Stoffströme in einem Depot trennen und entsprechend der weiteren Verwertung neu sortieren. D.h. beispielsweise Fahrzeugelektronik, Fahrzeugsensorik oder kleine E-Motoren aus Pkw werden in Paketen verpackt, von einem Dienstleister eingesammelt und an Elektroaltgeräteaufbereiter einerseits und Magnetaufbereiter andererseits weitergegeben. Da über den Onlin Handel ein leistungsfähiges Distributionsnetz aufgebaut ist, könnte dies bei kleinvolumigen Abfallströmen mit entsprechendem Rahmenvertrag relativ kostengünstig bewerkstelligt werden. Voraussetzung ist, dass sich die Pakete ohne größere Handhabungsaufwände in den Distributionsprozess einschleusen lassen und dass die abfallrechtliche Zulässigkeit der Transporte gewährleistet ist. Letzteres ist zu prüfen, sobald sinnvolle Bündelungen und die Art der Umsetzung identifiziert sind.

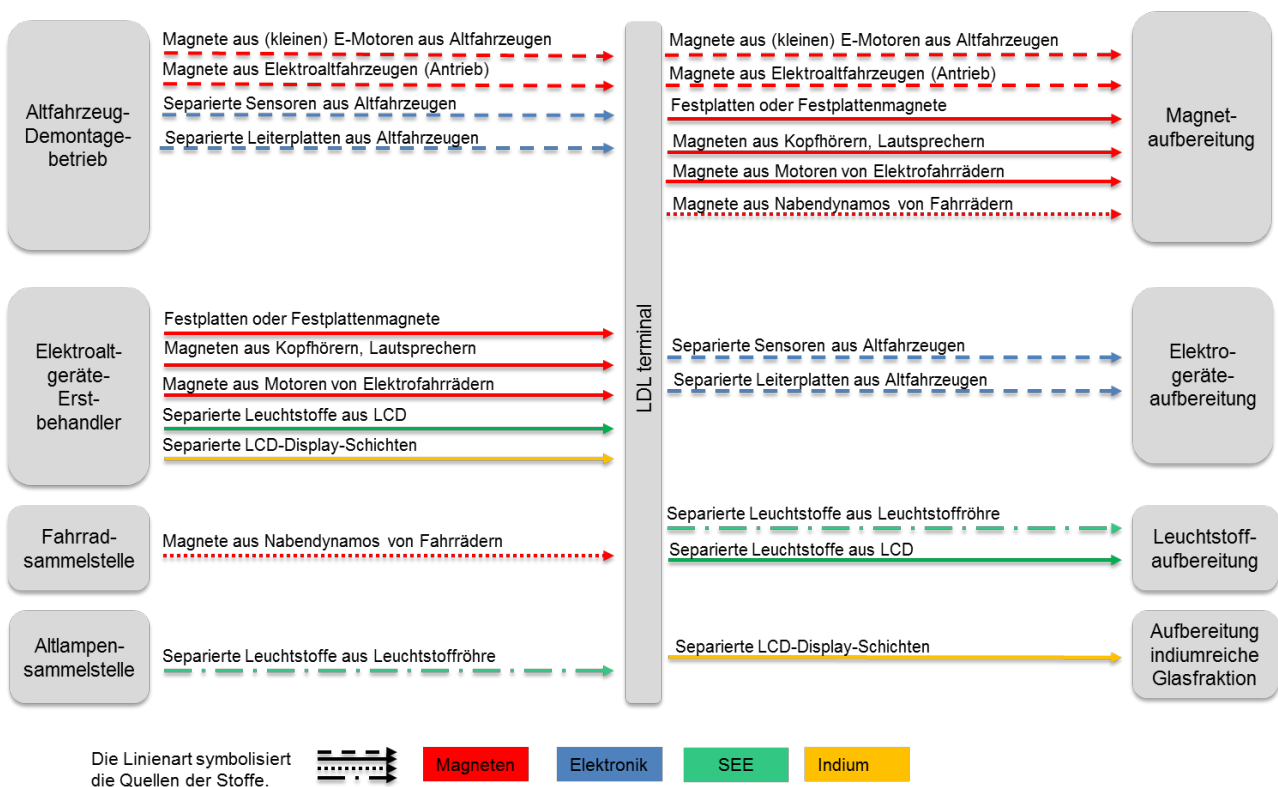
Eine weitere Workshop-Konstellation könnte das Zusammenbringen von Sammelstellen (aus der gleichen oder auch unterschiedlichen Branchen) mit deren potenziellen Abnehmern und Logistikern zur Entwicklung neuer Netzwerke sein. Dies kann immer dann hilfreich sein, wenn die betroffenen Akteure bisher noch nicht in Geschäftsbeziehungen stehen.

Ergänzend sollte die Alternative verfolgt werden, bereits etablierte Netzwerke wie z.B. der Autokatalysatorenverwertung, zumindest für die Einsammlung der Pakete mit unterschiedlichen bei den Altfahrzeugverwertern anfallenden Materialien zu nutzen. Alternativ kämen auch andere logistische Netze in Frage, die bereits heute regelmäßig Altfahrzeugverwerter anfahren. Dies wird ermöglicht, indem Aufbereiter von Autokatalysatoren oder alternative Sammeltouren Betreiber mit in die Gespräche eingebunden werden. Da deren Logistikdienstleister die relevanten Sammelstellen sowieso anfahren, ist es denkbar, dass ein – wenn auch eher geringes - zusätzliches Aufkommen von Paketen hilfreich ist, um die Auslastung des Dienstleisters zu verbessern und die Kosten für die Logistik zu teilen.

Für Stoffströme zur Katalysatortrennung scheint eine Bündelung machbar, aber wenig zielführend: Bereits heute etablierte Prozesse zur Aufbereitung von Autokatalysatoren sind nicht geeignet, um FCC-Katalysatoren mit zu integrieren. Die Integration der Autokatalysatoren in einen neu zu etablierenden Prozess zur Aufbereitung von FCC-Katalysatoren ist separat zu prüfen.

Abbildung 7 zeigt in den Workshops zu behandelnde Bündelungsoptionen. Die Stoffströme wurden nach sinnvollen Bündelungsmöglichkeiten ausgewählt. Beispielsweise sind Magnete von Windkraftanlagen aufgrund der Abholorte zur Bündelung nicht geeignet. Nach dem vorgeschlagenen Konzept holen ein (oder mehrere) Transporteure alle Abfallströme einer Sammelstelle ab, um sie in regionalen Umschlagpunkten (LDL-Terminals) neu nach Stoffströmen zusammenzustellen, um die Aufbereiter mit größeren, konsolidierten Mengen und somit effizienter ansteuern zu können.

Abbildung 7: Bündelungspotenziale ausgewählter Stoffströme.



2.4.2.5 Diskussion der grundlegenden Prozessveränderungen

Ein großer Teil der skizzierten Handlungsansätze wäre verbunden mit wesentlichen Änderungen in den Prozessen beteiligter Unternehmen. Dabei können abfallwirtschaftliche Unternehmen ebenso betroffen sein wie produzierende Unternehmen. Ob grundlegendere Änderungen umgesetzt werden, wird nicht von den Herausforderungen für das Recycling einzelner wert- und mengenmäßig eher wenig bedeutender Abfallströme wie den hier untersuchten bestimmt werden, sondern von den ökonomischen

misch und ökologisch tragenden Stoff- und Wertströmen. Gleiches dürfte für grundlegende rechtliche Neuerungen gelten.

Ob etwa ein durchgängiger Transfer von Produkt- und Werkstoffinformationen zwischen produzierender Wirtschaft und Recyclingwirtschaft zustande kommt, ob durch softwarebasierte Warenwirtschaftssysteme ganze Recyclingpfade hinsichtlich Effizienz und Informationsflüssen optimiert werden: Diese und andere Veränderungen dürften vor allem getrieben werden von dem Bemühen, das Recycling von Eisen/Stahl, Aluminium, Kupfer und anderen Hauptwertträgern voranzutreiben, die Wertschöpfung insgesamt zu verbessern und neue Geschäftsmodelle umzusetzen. Wenn neue Ansätze realisiert werden, dann wird sich ihre Ausgestaltung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht an den Notwendigkeiten etwa der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Magnetwerkstoffen ausrichten sondern an der Gesamtheit der Potenziale, etwa durch legierungsgenaue Separation von Eisen-Metallen, Aluminium und Magnesium oder zur weiteren Verbesserung der Edelmetallausbeute aus Leiterplattenschrotten.

Die Veränderungen, die dabei gerade durch zunehmende Digitalisierung möglich werden, können durchaus grundlegend sein. Hierzu sind viele Szenarien denkbar, wie beispielsweise die folgenden:

- Findet die Demontage der Zukunft mit direkter Anbindung der Zerlegekräfte an digitale Informationsquellen statt? Werden Mitarbeiter mit Stirnkameras Fahrgestellnummern oder Barcodes fixieren und in Echtzeit für den Demontagebedarf maßgeschneiderte Zerlegeanweisungen über Smart Glasses eingespielt bekommen? Wird ihr Vorgesetzter hierzu online ein Auswahlmenü bedienen können, das ihm Wertanalysen der Komponenten und von ihm selbst bereitgestellte Vergütungssätze für Materialfraktionen sowie voraussichtliche Demontagezeiten anzeigt? Wird das Management des Unternehmens zur Auswahl der Demontageaufträge entweder einen Schwellenwert oder Einzelauswahl per Mausklick auswählen können?
- Wird manuelle Arbeit aus der Demontage weitgehend verschwunden sein? Werden Roboter die Hauptarbeit übernehmen und dabei direkt auf Datenquellen aus der Produktionshistorie zugreifen? Werden diese Roboter gleichzeitig Funktionstests durchführen, um für den Gebrauchtteilemarkt geeignete Komponenten zu identifizieren und auszusortieren?
- Wird der Datentransfer von der Produktion in die Demontage weitgehend unkritisch sein, weil immer mehr Hersteller die Möglichkeit nutzen, die Lebenswege ihrer Produkte bis hin zur Entsorgung selbst in die Hand zu nehmen? Werden sie auf diese Weise Wartung und Demontage selbst übernehmen, den Gebrauchtgerätemarkt selbst steuern und so noch mehr über Kunden und ihr Nutzungsverhalten erfahren als bisher?
- Wird ein Datentransfer von den Herstellern zum Demontagebetrieb gar nicht mehr erforderlich sein, weil Zerlegeprozesse von selbstlernenden Robotersystemen erarbeitet und fortlaufend erweitert und optimiert werden?
- Werden Unternehmen, die dichtgespannte Logistiknetze aufgebaut haben, jederzeit und überall kleinste Mengen erfassen und die Zerlegung in Demontagebetrieben über Internet basierte Plattformen mit automatisierten Preisvergleichen und Qualitätsbewertungen steuern?
- Werden automatische Sortierprozesse die klassische Demontage nach und nach verdrängen? Wird es durch weitere Steigerung der Rechengeschwindigkeit möglich sein, kleinste Partikel in unvorstellbar großer Geschwindigkeit zu analysieren? Werden mehrstufige Sortierprozesse durch frei wählbare Rückführungsschleifen und Echtzeitanalyse der Zusammensetzung sämtlicher Teilstoffströme komplexe Sortierprozesse autonom steuern? Wird es so möglich sein, durch kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter an wechselnde Inputzusammensetzungen und Sortiererfolge heute unvorstellbare Ausbeuten bei eindrucksvollen Durchsätzen zu erzielen?

Diese und viele andere Zukünfte der Recyclingwirtschaft sind vorstellbar und könnten auf lange Sicht realisiert werden. Es wäre eigene Projekte wert, in Szenarioanalysen unter Beteiligung der relevanten Akteure solche Zukunftsbilder zu entwickeln, zu plausibilisieren und neue zu entwerfen.

Die in den folgenden Abschnitten erarbeiteten Handlungsansätze sind auf kürzere Zeithorizonte angelegt. Sie sind ambitioniert, haben aber nicht den Anspruch visionär zu sein. Ziel ist vielmehr, für die betrachteten Abfallströme Maßnahmenoptionen für die absehbare Zukunft zu entwickeln, aber auch Limitierungen aufzuzeigen.

2.4.3 Seltenerdmetallhaltige separierte Magnetwerkstoffe

2.4.3.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Zu Machbarkeit und Potenzialen der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Permanentmagneten wurden zahlreiche Studien durchgeführt. Eine Übersicht über den derzeitigen Forschungsstand findet man bei Yang Y. et al. (Yang Y. et al. 2016; S. 122-149), Elwert et al. (Elwert et al. 2017) oder bei Binnemans et al. (Binnemans et al. 2013; S. 1–22). Tabelle 30 zeigt die Mengen- und Wertpotenziale an NdFeB-Magneten in Deutschland für das Jahr 2020 aus unterschiedlichen Einsatzbereichen sowie die typischen Zusammensetzungen der Magnete.

Tabelle 30: Mengen- und Wertpotenziale an NdFeB-Magneten im Abfall im Jahr 2020 aus unterschiedlichen Einsatzbereichen sowie die typischen Zusammensetzungen der Magnete

Anwendungsbereich	Zusammensetzung (%)	Neuwarenwert ^[1] SEE-im Magnetmaterial €/kg	Gesamtmenge des Abfallstroms (Magnetmaterial) 2020				Trend
			Deutschland ^[2]		Deutschland u. angrenzende Staaten (in Klammern: EU gesamt) ^[3]		
			t	T € (max.)	t	T € (max.)	
IT (Festplatten, Kopfhörer, Lautsprecher)	Nd: 26-31 Pr: 0- 5, Dy: 0	15 - 22	275 ^[4]	6.100	700 (1.380)	15.210 (30.000)	sinkend
Industriemotoren	Nd: 20 Pr: 0, Dy: 10	43	60	2.580	153 (302)	6.567 (13.130)	steigend
Elektrofahrräder: Motoren	Nd: 25 Pr: 4, Dy: 2	24	24	580	61 (120)	1.470 (2.900)	stark steigend
Windenergieanlagen	Nd: 29 Pr: 0- 4, Dy: 2-6	17-35	11	385	28 (56)	978 (1.927)	steigend
PKW (Antrieb Hybrid- und Elektrofahrzeuge)	Nd: 20 Dy: 10	43	10	430	25 (50)	1.096 (2.193)	stark steigend
PKW (kleine E-Motoren)	Nd: 28 Pr: 1, Dy: 1	19	67	1.273	168 (335)	3.182 (6.277)	stark steigend
Raumklimaanlagen	Nd: 20-28 Pr: 0-2, Dy: 0-10	12-21	9	180	22 (43)	456 (900)	stark steigend
Nabendynamos	Nd: 21 Pr: 0, Dy: 9	41	5	200	12 (24)	497 (980)	steigend
MRT	Nd: 20-29 Pr: 1- 5, Dy: 1-5	15-33	10	330	25 (50)	838 (1.658)	gleichbleibend
Summe			471	12.058	1.194 (2.360)	30.294 (59.965)	

[1] SEE = Seltenerdelemente; Nd: 51 €/kg; Pr: 122 €/kg; Dy 331 €/kg (Quelle: USGS 2017)

[2] Quellen: Werte für Deutschland beruhen auf Daten von Sander et al. (Sander et al. 2017; S. 35; sowie Sander et al. 2012, S. 58), ausgenommen PKW (Antrieb Hybrid- und Elektrofahrzeuge) [Annahme 4.000 Fahrzeuge mit ca. 2,4 kg Magnetmaterial pro Fahrzeug (Zepf 2015, S. 469)] und PKW (kleine E-Motoren) [Annahme 134 g Magnetmaterial in Magneten pro Fahrzeug (Basis: Groke et al. 2017; S. 87 und 89: ca. 30-50g Seltenerdmetalle je nicht aktuelles Fahrzeug) bei 500.000 Fahrzeugen; hier nur erfasste Fahrzeuge, Potenzial höher, aber nicht bekannt];

[3] Abschätzung zu Nachbarländern und EU-Staaten abgeschätzt über BIP; angrenzende Staaten: berücksichtigt sind die größeren Nachbarstaaten Frankreich, Belgien, Niederlande, Österreich, Dänemark, Tschechien und Polen.

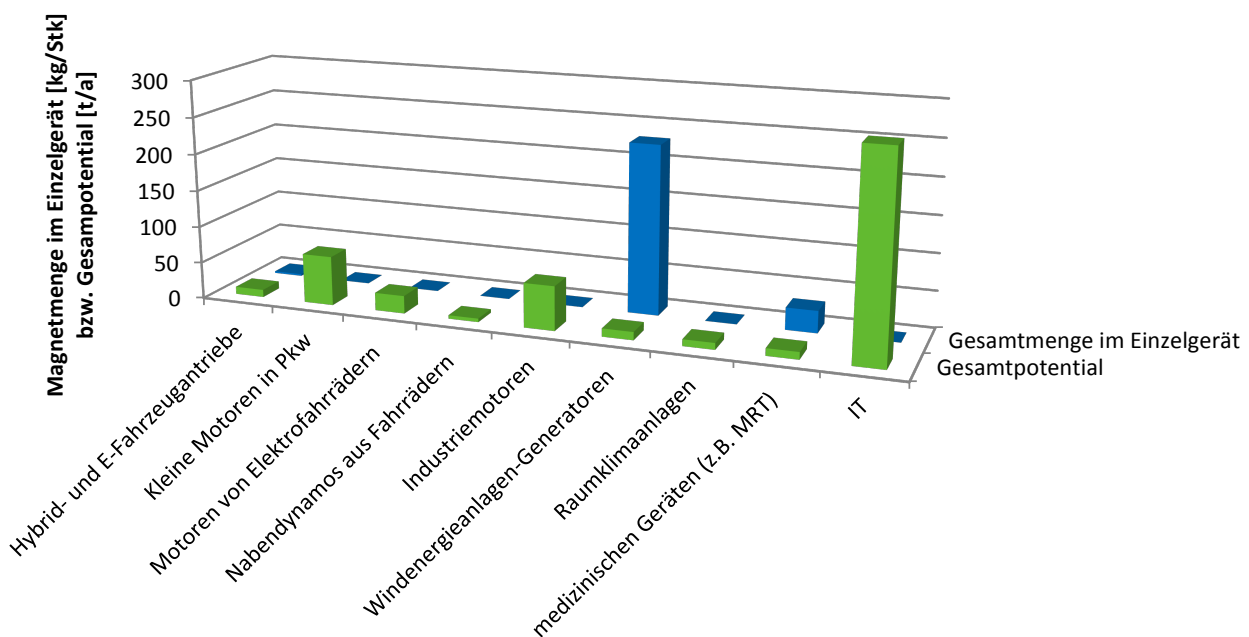
[4] abgeleitet aus Mittelwert der Summen aller in Sander et al. 2012, S. 58 quantifizierten Nd-Gehalte in Geräten der Sammelgruppe 3 (Informations- und Telekommunikationsgeräte)

Die Angaben zu den Seltenerdmetallgehalten der Magnetwerkstoffe sind als Näherung zu verstehen, da die Zusammensetzung innerhalb der Anwendungsgruppen erheblich streuen kann. Die Mengen- und Wertangaben stellen nicht das tatsächlich verfügbare Potenzial dar, denn ein großer Teil dieser Mengen fällt nicht in Deutschland und meist auch nicht in Europa als Abfall an, weil sie in Geräten enthalten sind, die als Gebrauchtgeräte exportiert werden. Ein weiterer erheblicher Teil geht durch unsachgemäße Entsorgung verloren. Entsprechende Zahlen sind nicht für alle Abfallströme verfügbar.

Heute entfallen 58 % des Gesamt mengen- und die Hälfte des Gesamtwertpotenzials auf IT. Die drei größten Quellen, nämlich IT, Industriemotoren und kleine E-Motoren aus Pkw machen zusammen mehr als 80% des Mengen- und Wertpotenzials aus. Für Elektrofahrräder, Pkw und Raumklimaanlagen wird künftig mit einem starken Wachstum der Mengen an NdFeB-Magneten gerechnet.

Wie Abbildung 8 zeigt, ist die Magnetmenge pro Einzelgerät in den Abfallströmen mit den größten Aufkommen (kleine E-Motoren in Pkw, Industriemotoren und IT) sehr klein, während die Abfallströme mit einer großen Magnetmenge pro Einzelgerät (Windenergieanlagen-Generatoren, Raumklimaanlagen und medizinische Geräte) derzeit nur ein geringes Gesamtpotential aufweisen.

Abbildung 8: Gesamtmenge im Einzelgerät in kg/Stück über das Gesamtpotential an Magnetmaterial in Deutschland im Jahr 2020 in t/a



Verbleib von Magneten aus IT

NdFeB-Magnete werden im IT-Bereich vor allem in kleinen Motoren, Festplatten und Lautsprechern eingesetzt. In Festplatten kommen dabei sowohl polymergebundene Magnete in den Spindelmotoren als auch gesinterte Magnete im Schwingspulenbetätiger vor. Die Gesamtmenge an Neodym in Magneten, die in Elektrogeräten in Deutschland in Verkehr gebracht wurden, wurde bei Sander et al. (Sander et al. 2012; S. 59) mit 61,8 bis 96,8 t für das Jahr 2010 angegeben. Aus dem Mittelwert dieser Spannweite ergibt sich bei einem Neodymgehalt von 29 % ein Gesamtmagnetaufkommen von ca. 275 t im Jahr. Die in Laptops verwendeten Magnete haben dabei ein Gewicht zwischen 1,1 und 3,0 g (Buchert et al. 2012; S. 25).

Die im IT-Bereich verwendeten Magnete enthalten in der Regel keine oder nur geringe Mengen Dysprosium. Durch den deutlich höheren Materialwert von Dysprosium im Vergleich zu Neodym liegt daher der Materialwert der Magneten mit zwischen 15 und 22 €/kg (Neuwarenwert) deutlich niedriger als der Materialwert der in Industriemotoren eingesetzten Magnete (43 €/kg).

Die Sammlung von Elektroaltgeräten ist in Deutschland über das ElektroG geregelt. Festplatten und Lautsprecher werden in den meisten Erstbehandlungsanlagen zusammen mit anderen Geräteteilen mechanisch zerkleinert und anschließend sortiert. Magneteile haften bei der Sortierung an Stahlteilen an und werden somit in die Stahlfraktion sortiert und anschließend verhüttet. Dabei gehen die Seltenerdmetalle vollständig verloren.

Verbleib von Magneten aus Industriemotoren (Buchert et al 2014; S. 14 ff, S. 33 und S. 34.)

NdFeB-haltige Industriemotoren kommen in sehr unterschiedlichen Größen auf den Markt. Dementsprechend variieren auch die enthaltenen Massen an Magnetmaterial von wenigen Gramm bis zu mehreren Hundert Kilogramm. Buchert et al. geht in einer Abschätzung von durchschnittlich 0,175 kg Magnetmaterial pro Motor aus.

Bei permanenterregten Gleichstrommotoren befinden sich die Magnete im Stator. Für den Einsatz von NdFeB-Magneten sind aber permanenterregte Synchronmotoren mit Magneten im Rotor, die zudem immer häufiger eingesteckt („vergraben“) statt aufgeklebt und durch Bandagen fixiert werden, von wachsender Bedeutung.

Beschädigte Motoren sowie Maschinen und Anlagen, die Motoren enthalten, werden an Reparaturbetriebe gegeben, die sie entweder repariert zurückgeben oder an Entsorgungsunternehmen verkaufen, und dort in der Regel geschreddert und ohne Abtrennung von Magnetwerkstoffen automatisch sortiert.

Magnete werden bei der Reparatur defekter Motoren nur selten ausgetauscht. Somit fallen diese Magnete in der Regel erst am Ende der Motor-Lebensdauer an, die für Industriemotoren mit 12-20 Jahre bei steigender Tendenz angegeben wird (Almeida et al 2012, zitiert nach Buchert et al. 2014; S 24). Da Motoren mit NdFeB-Magneten erst seit ca. 10 Jahren vermehrt im Einsatz sind, sind größere Abfallmengen erst in der Zukunft zu erwarten.

Buchert et al. schätzen die Mengen an NdFeB-Magneten, die für das Recycling zur Verfügung stehen, auf derzeit ca. 35 t/a und rechnen mit einem Anstieg auf ca. 100 t/a bis 2030. Auch von diesen Mengen geht allerdings der erhebliche Anteil ab, der in Gebrauchtmotoren bzw. -maschinen enthalten ist, die ins Ausland verkauft werden (Buchert et al. 2014; S. 38).

Eine Identifizierung von NdFeB-haltigen Motoren bei den Entsorgungsunternehmen ist derzeit im Regelfall nicht gewährleistet.

Tabelle 31: Bewertung des Ist-Zustandes der Erfassung von NdFeB-haltigen Abfällen aus Sicht der Logistik

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung der magnethaltigen Geräte zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, denn ein großer Teil der magnethaltigen Geräte mindestens aus einem Teil der Abfallströme (Fahrzeuge, IT) wird nicht in Deutschland und Europa entsorgt, dies wirkt sich direkt auf das verwertbare Mengenpotenzial aus.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Grundsätzlich ja, es fehlt allerdings insbes. bei Industriemotoren z.T. die Information zur Steuerung der NdFeB-haltigen Magnete in Prozesse, in denen die Magnete separiert werden können; bei konventionellen Fahrrädern erfolgt die Erfassung meist in Metallschrottcontainern wodurch eine Separation von Magneten nicht mehr möglich ist.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, derzeit ist dieser Verwertungspfad nicht in nennenswertem Umfang realisiert, daher existiert keine Bündelungslogistik für aus den Geräten separierte Magnete oder magnethaltige Bauteile.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	s.o.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	s.o.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Die relevanten Akteure verfügen über die erforderlichen Fertigkeiten. Es fehlen allerdings bei einem Teil der Abfälle Kenntnisse darüber, welche Geräte NdFeB-Magnete enthalten und welche mit vertretbarem Aufwand ausgebaut werden könnten.

2.4.3.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Die Festlegung einer Ziel-Verwertungskette ist derzeit nur begrenzt möglich, weil wichtige technische, marktliche, organisationale und rechtliche Faktoren nicht feststehen. Die folgenden Szenarien können daher nur als Orientierungsrahmen dienen. Dies soll hier am Beispiel des Magnetismus erläutert werden, gilt aber für diesen und andere in dieser Untersuchung betrachtete Abfallströme auch im Falle anderer Einflussgrößen.

Entmagnetisierung

Für die Zuordnung von Aufgaben zu unterschiedlichen Akteuren, zur Ausgestaltung von Logistikprozessen, aber auch zur möglichen Festlegung rechtlicher Regelungen ist es von Bedeutung, an welcher Stelle des Prozesses und in welcher Demontagetiefe der Ausbau von NdFeB-Magneten z.B. aus Industriemotoren erfolgt. Dies wiederum hat Einfluss auf den Entmagnetisierungsprozess. Ohne Entmagnetisierung sind bei der Handhabung insbesondere größerer Magnete besondere Vorsichtsmaßnahmen zu

beachten. So besteht Verletzungsgefahr, z.B. durch Aufeinanderprallen größerer Magnete, es kann zur Störung oder Schädigung elektronischer und mechanischer Geräte kommen, und die Magnete sind nur noch schwer zu trennen, wenn sie einmal direkt aufeinander sitzen. Weiterhin sind für Transport und Lagerung separierter Magnete besondere Vorkehrungen zu treffen (Abschirmung des Magnetismus, Vereinzelung der Magnete im Behälter).

Eine Entmagnetisierung von NdFeB-Magneten kann bei Temperaturen von etwa 350°C erfolgen. Hierzu ist ein Ofen mit Absaugung und Filter erforderlich, für den Investitionskosten anfallen, die von Erstbehandlern aufgrund der eher geringen Magnetmengen in der Regel nicht aufgebracht werden können. Zudem ist eine Entmagnetisierung in vielen kleinen Öfen bei den Erstbehandlern energetisch und wirtschaftlich ineffizient. Auf der anderen Seite sind Lagerung und Transport der nicht entmagnetisierten Magnete aufgrund der erforderlichen Abschirmung und Vereinzelung aufwendig und kostspielig. Die Entmagnetisierung bei einem zentralen Aufbereiter könnte aufgrund des wesentlich höheren Durchsatzes in einem größeren und – auch hinsichtlich der Verweilzeiten – effizienteren Durchlaufofen erfolgen.

Da die Magnete meist in Rotoren verbaut sind, könnten Rotoren mitsamt den Magneten zum zentralen Aufbereiter transportiert und dort die Magnete ausgebaut werden. So würde sich deren Vereinzelung beim Transport zum Aufbereiter erübrigen und der Abschirmbedarf wäre deutlich geringer.

Sortierung nach Magnettypen

Die separierten NdFeB-Magnete müssen in kontrollierter Weise der weiteren Aufbereitung zugeführt werden. Es muss gewährleistet sein, dass keine anderen Magnettypen (z.B. Samarium-Kobalt-Magnete, Ferritmagnete) in den Prozess geraten. Zudem variieren NdFeB-Magnete erheblich in der Zusammensetzung, sodass eine Sortierung nach Gruppen kaum verzichtbar erscheint. Auch bei dieser Sortierung der Magnete sind unterschiedliche Lösungen möglich.

Erfolgt eine Sortierung nach Kenntnis der Motorentypen oder nach (ggfs. vorgeschriebener) Kennzeichnung der Motoren auf den Typschildern beim Erstbehandler, dann geht die Verbindung zu diesen Informationen mit dem Ausbau der Rotoren oder Magnete verloren. Die Sortierung nach Gruppen müsste also bereits durch den Erstbehandler erfolgen. Der Weiterverarbeiter müsste sich mit der Frage auseinandersetzen, wie er Fehlsortierungen erkennen und damit seine Prozessqualität sichern kann.

Andererseits wäre es denkbar, nach der Entmagnetisierung eine automatische Sortierung der Magnete vorzunehmen. Methoden wie die PGNAA erlauben eine Analyse der Zusammensetzung unzerstörter Magnete über deren gesamtes Volumen und könnten kontinuierlich und automatisiert über ein Förderband mit Austragsvorrichtung realisiert werden.³³ Die Kosten für diese Analyseinrichtung sind allerdings erheblich. Ein solches Investment wäre nur bei großen Durchsätzen zu rechtfertigen. In diesem Falle würde es genügen, wenn der Erstbehandler mit einiger Sicherheit erkennt, in welchen Motoren NdFeB-Magnete enthalten sind. Sortierung und Qualitätskontrolle könnten beim Magnetaufbereiter erfolgen.

Ein finanzstarker Magnetaufbereiter würde möglicherweise frühzeitig in aufwendige Entmagnetisierungs-, Analyse- und Sortiertechnik investieren, um den Markt möglichst schnell besetzen zu können. Wahrscheinlicher dürfte es sein, dass in der Übergangszeit die Identifizierung mit kostengünstigeren Analysemethoden anhand der Magnetoberfläche bei dann allerdings höherem Aufwand zur Freilegung der Oberfläche erfolgt.

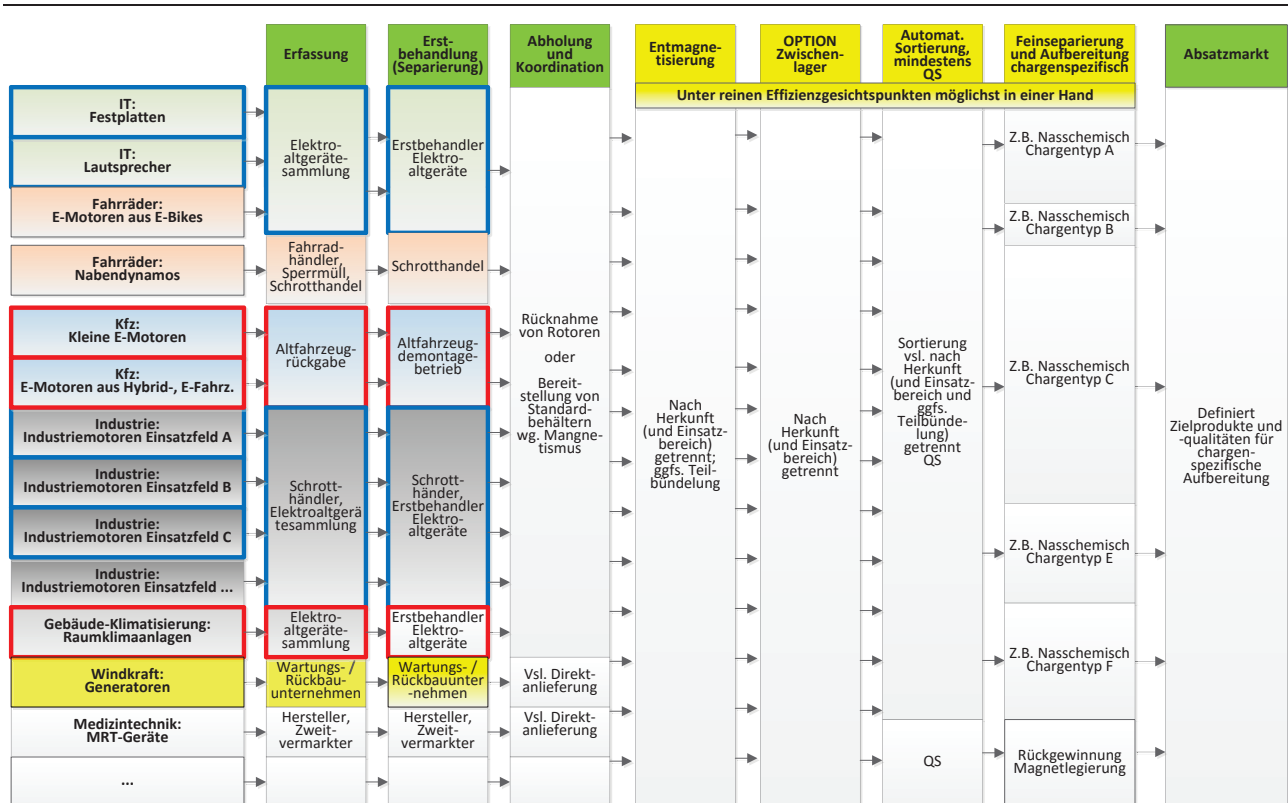
³³ Persönliche Auskunft Aachen Institute für Nuclear Training GmbH (AiNT)

2.4.3.3 Prozessketten- und Bündelungskonzept

Welcher dieser Ansätze gewählt wird und wie sich die übrigen Schritte der Prozesskette darum herum gruppieren (müssen), ist vorab nur sehr begrenzt einschätzbar.

Abbildung 9 zeigt ein mögliches grobes Prozesskonzept für die Bündelung und Verarbeitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen.

Abbildung 9: Grobes Prozesskettenkonzept zur Bündelung und Aufbereitung von NdFeB-Magneten aus unterschiedlichen Quellen; blaue Rahmen: derzeit mengenmäßig dominante Abfallströme; rote Rahmen: stark wachsende Mengenströme



Grundsätzlich sind zwei Arten der Bündelung zu unterscheiden: Bündelung in der Abholung und Bündelung in der Aufbereitung und Verarbeitung.

Bei der Abholung senkt ein gemeinsamer Transport von Mengen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen, aber einheitlichen Anfallstellen in der Regel die Transportkosten. Solange Art und Herkunft des Materials gekennzeichnet sind, können diese in den technischen Folgeprozessen immer noch je nach Bedarf separat oder zusammen verarbeitet werden. Allerdings ist der Handhabungsaufwand auch von Art und Größe der verwendeten Behältersysteme abhängig: die Entleerung vieler kleiner Behälter verursacht höheren Aufwand als die weniger großer.

An welchen Stellen der Prozesskette zur Aufbereitung und Verarbeitung Teilmengen gebündelt, also vermischt werden sollten, ist vorab nicht pauschal festlegbar. Dies hängt unter anderem ab von

- Größe und Einheitlichkeit der Teilmengen: für große und einheitliche Mengen ist eine separate Verarbeitung und damit eine Getrennthaltung bis in späte Prozessschritte oft wirtschaftlicher. Kleine und eher minderwertige Teilmengen werden eher früh zusammengeführt und gemeinsam verarbeitet.
- Art und Menge der enthaltenen Fremdstoffe: Z.B. muss vermieden werden, große, saubere Materialströme mit weniger sauberen Strömen zu vermischen.

- Der Art des für ein Material vorgesehenen Aufbereitungsverfahrens: Jedes Verfahren hat andere Anforderungen an den Prozessinput.
- Den Anforderungen der Qualitätssicherung: Je höher die Anforderungen an die Qualitätssicherung, desto wichtiger ist die Rückverfolgbarkeit einzelner Stoffströme bis zur Materialquelle. Große und hochwertige Einzelmengen werden andere Qualitätssicherungsprozesse durchlaufen als kleine und eher minderwertige.
- Den Anforderungen der Abnehmermärkte an die Produktqualität der jeweiligen Endprodukte und der Höhe der zu erwartenden Vergütung. Diese Faktoren beeinflussen wiederum, für welche Abfallströme eine Separathaltung wirtschaftlich vorteilhaft ist.

Eine gemeinsame Verarbeitung aller Teilströme in einem Prozess zu einem Seltenerdmetallkonzentrat ist grundsätzlich denkbar, hat jedoch wesentliche Nachteile:

- Die erreichbare Wertschöpfung ist eher gering.
- Die Möglichkeit zur Erzeugung unterschiedlicher Produktarten (z.B. Magnetlegierungen, bedarfsgerechte einheitliche Konzentrate) besteht nicht.
- Der technische Prozess muss in jeder Stufe und für den gesamten Massenstrom auf alle zu erwartenden Materialeigenschaften, Verunreinigungen etc. zugleich ausgerichtet sein.
- Große und hinsichtlich der Zusammensetzung einheitliche Einzelmagnete werden durch die Mischung mit anderem Material wertgemindert.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist daher davon auszugehen, dass es – auch noch innerhalb der in Abbildung 9 dargestellten Systematik - zu Prozess-Varianten kommt. So würden große Magnete etwa aus großen Motoren oder Windkraftanlagen über angepasste Prozessketten laufen müssen. Aufgrund ihrer hohen Stückgewichte benötigen diese Magnete entsprechend dimensionierte Transportmittel (Fahrzeuge, Behälter) und Maschinen, etwa für Entmagnetisierung und Zerkleinerung. Zudem handelt es sich um große definierte Einzelmengen mit entsprechend hohem Materialwert, die nicht mit anderem Material vermischt werden sollten, um Verunreinigungen zu vermeiden.

Magnetmaterial, das in größerer Menge in gut definierter Form und Zusammensetzung anfällt, könnte ggfs. direkt, etwa zur Rückgewinnung von Magnetlegierungen, weiterverarbeitet werden.

Auch wäre zu prüfen, ob eine Entmagnetisierung polymergebundener Magnete in separaten Prozessen erfolgen muss, weil sich die Polymermatrix bei den erforderlichen Temperaturen zersetzt.

Für Magnete aus Festplatten wären anstelle einer manuellen Entfernung aufgrund der geringen Stückgewichte stärker mechanische Verfahren zu wünschen. So wird in der Literatur etwa eine Entmagnetisierung und anschließende Hydrierung der FE-Fraktion aus der Festplattenzerkleinerung vorgeschlagen, bei der die Magnete pulverförmig zerfallen (Völker, Weckerle 2015; S. 6). Dass dieses Verfahren für sich allein mit vertretbarem Aufwand zu guten Qualitäten und Ausbeuten führt, ist zu bezweifeln. Bei hinreichend großen Mengen wäre aber denkbar, dass die FE-Fraktion ebenfalls bei der zentralen Aufbereitung entmagnetisiert und weiterverarbeitet wird. Ähnliches könnte z.B. auch für Magnete aus Lautsprechern geprüft werden. Ein anderer Ansatz wird im EU-Projekt Remanence entwickelt. Hier wird in einem teilautomatisierten Prozess spektroskopisch die Position der NdFeB-Magnete in der unzerstörten Festplatte ermittelt. Der entsprechende Teil der Festplatte wird dann komplett abgetrennt. Anschließend erfolgen die Hydrierung des Festplattensegments und die Separierung des Magnetpulvers. (Remanence 2018). Mit diesem Verfahren dürften deutlich höhere Reinheiten erzielbar sein, es wird allerdings mit relativ hohen Kosten für Analyse- und Handhabungstechnik verbunden sein.

Eine Aufbereitung bis hin zur Gewinnung reiner Seltenerdmetalle oder -metalloxide erfordert sehr aufwendige und komplexe Trennprozesse und ist daher realistisch wohl nur vorstellbar in einer bestehenden Anlage, in der bereits solche Prozesse betrieben werden.

Zentrale Aufbereiter für NdFeB-Magnete würden sich, sofern sie nicht selbst bereits solche Prozesse betreiben, auf die Rückgewinnung von Magnetlegierungen und/oder die Abtrennung von Seltenerdmetalloxid-Konzentraten aus den Magneten beschränken. Die erhaltenen Konzentrate würden dann an Aufbereitungsspezialisten für Seltenerdmetalle abgegeben werden.

Das für ein Recycling von NdFeB-Magneten wesentliche Akteursfeld gliedert sich in folgende Gruppen:

Die Erfassung von 80 % des gesamten Mengenpotenzials an Altprodukten, die NdFeB-Magnete enthalten, kann im Wesentlichen erfolgen über

- Elektroaltgerätesammlung (Kommunen, Handel, Hersteller)
- Altfahrzeugrückgabe (Rücknahmestellen, Demontagebetriebe)
- Motoreninstandsetzung
- Abbau von Maschinen und Anlagen

Die erste Behandlungsstufe liegt im Wesentlichen bei

- Elektroaltgeräte-Erstbehandlern
- Altfahrzeug-Demontagebetrieben

2.4.3.4 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Altfahrzeugdemontage

Die Recycling-Kette beginnt mit der Rücknahme der Altfahrzeuge. Diese können bei behördlich anerkannten Annahmestellen, Rücknahmestellen und Demontagebetrieben zurückgegeben werden. Behördlich anerkannte Annahmestellen und Rücknahmestellen überlassen die Altfahrzeuge den Demontagebetrieben. Hier sollen der Ausbau der Motoren und die Separation der Magnete bzw. der magnethaltigen Rotoren stattfinden. Die Magnete bzw. Rotoren werden der zentralen Aufbereitung zugeführt und dort entmagnetisiert und zu marktfähigen Produkten aufbereitet. Tabelle 32 und Tabelle 33 zeigen die Mengengerüste eines durchschnittlichen Altfahrzeugdemontagebetriebs für die Demontage von Antriebssträngen aus Hybrid- und Elektrofahrzeugen sowie kleine E-Motoren aus Pkw für das Jahr 2020. Es ist zu beachten, dass erst nach 2020 mit einem starken Wachstum des Mengenpotenzials gerechnet wird.

Tabelle 32: Mengengerüst Magnete aus Antriebssträngen von Hybrid- und Elektro-Altfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 10.000 kg Magnete /Jahr (aus 4.000 Elektro-/Hybridfahrzeugen) Tendenz zukünftige Mengen: stark steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 43 € (Neuwarenwert) Gesamt: 430.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(1.250 Demontagebetriebe) 8 kg Magnete / Jahr (aus 3,2 Elektro-/Hybridfahrzeugen) 0,13 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	344 € Umsatz / Jahr 7,17 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!) Zusätzliche Erlöse durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Kupfer-, Aluminium- und Magnesiumfraktionen nicht berücksichtigt
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt 2015)
Finanzierbare Arbeitszeit	0,26 Stunden pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Altfahrzeug ca. 2,4 kg (Zepf 2015, S. 469) Magnetwert pro Altfahrzeug ca. 108 €. Zusätzliche Erlösmöglichkeiten durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Kupfer-, Aluminium- und Magnesiumfraktionen. Angaben von Bast et al. zufolge ist die Demontage der magnethaltigen Rotoren durch diese Erlöse bereits wirtschaftlich (Erlöse pro Fahrzeug 26 bzw. 38 € höher als Demontagekosten) (Bast et al. 2014, S. 91-92).

Es wird deutlich, dass das Geschäftsvolumen aus NdFeB-Magneten für einen durchschnittlichen Demontagebetrieb mit drei Elektro-Altfahrzeugen im Jahr 2020 gering ist. Wenn das Aufkommen entsprechender Elektroaltfahrzeuge längerfristig erheblich wächst und Gesamtdurchsätze möglich werden, die zur Umsetzung der Gesamtprozesskette bis zur Gewinnung marktfähiger Materialfraktionen führen, könnte dieser Abfallstrom mit vergleichsweise großen Magneten für größere Betriebe interessant werden. Möglicherweise können einzelne Demontagebetriebe durch Spezialisierung auf solche Fahrzeuge auch größere Mengen an sich ziehen. Mögliche Mehrerlöse für bei der Demontage der magnethaltigen Rotoren anfallende sortenreine Kupfer-, Aluminium- und Magnesiumfraktionen senken dabei die Wirtschaftlichkeitsschwelle erheblich.

Tabelle 33: Mengengerüst Magnete aus kleinen E-Motoren aus Altfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 67.000 kg Magnete /Jahr (ca. 134 g Magnetmaterial pro Fahrzeug bei 500.000 Fahrzeugen) Tendenz zukünftige Mengen: steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 19 € (Neuwarenwert) Gesamt: 1.273.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(1.250 Demontagebetriebe) 53,6 kg Magnete / Jahr 1,1 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	1.018 € Umsatz / Jahr 21,21 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt 2015)
Finanzierbare Arbeitszeit	0,75 Stunden pro Woche
Mengen und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Altfahrzeug ca. 134g (Basis: Groke et al. 2017; S. 87 und 89: ca. 30-50g Seltenerdmetalle je nicht aktuelles Fahrzeug) Magnetwert pro Altfahrzeug ca. 2,55 €

Aufbereitung von Fahrrädern

Aus Fahrrädern können an zwei Stellen NdFeB-Magnete gewonnen werden: Motoren aus Elektrofahrrädern und Nabendynamos. Die Rückgabe von Fahrrädern erfolgt entweder über kommunale Sammelstellen oder auch über den Fahrradhandel und andere Unternehmen, die sie zu Gebrauchträdern aufbereiten oder ihrerseits verschrotten, wenn dies nicht mehr möglich ist. An den kommunalen Sammelstellen werden konventionelle Fahrräder dem Eisenschrott zugeführt. Während konventionelle Fahrräder nicht dem Anwendungsbereich des ElektroG unterfallen, fallen die Fahrradbeleuchtung, Felgen- und Nabendynamos konventioneller Fahrräder in den Anwendungsbereich des ElektroG, soweit sie nicht dergestalt fest verbunden mit dem Fahrrad in Verkehr gebracht werden, dass eine Trennung mit unverhältnismäßigem Aufwand verbunden wäre, was insbesondere bei Nabendynamos der Fall sein kann (vgl. § 2 Abs. 2 Nr. 2 ElektroG).

Für Elektrofahrräder gilt Folgendes: Vom Anwendungsbereich des ElektroG ausgenommen sind nach § 2 Abs. 2 Nr. 7 ElektroG Verkehrsmittel zur Personen- und Güterbeförderung. Das ElektroG gilt jedoch für elektrische Zweiradfahrzeuge, für die eine Typpenehmigung nicht erforderlich ist. Dies bedeutet im Ergebnis: Fahrräder mit einer Trethilfe bis zu 25 km/h (sog. Pedelecs) unterliegen den Regelungen des ElektroG. Demgegenüber unterfallen Elektrofahrräder mit unlimitierter Tretunterstützung (S-

Pedelec), mit tretunabhängigem Zusatzantrieb (E-Bike) sowie Elektrofahrräder ohne Tretantrieb nicht dem ElektroG, sondern sind nach den Vorschriften des KrWG zu entsorgen.

Soweit die Elektrofahrräder dem ElektroG unterfallen, sind sie bei der Annahme durch Fahrradhändler und -aufbereiter als Elektroaltgeräte zu entsorgen und somit Elektroaltgeräte-Erstbehandlern zuzuführen. Der Ausbau der Magnete könnte im Falle der Elektrofahrräder bei Elektroaltgeräte-Erstbehandlern erfolgen. Bei der gängigen Erfassung konventioneller Fahrräder über FE-Schrottcontainer ist eine Demontage der Magnete aus den Nabendynamos nicht mehr realistisch möglich. Tabelle 34 und Tabelle 35 zeigen die Mengengerüste hierzu.

Tabelle 34: Mengengerüst Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 24 t Magnete /Jahr Tendenz zukünftige Mengen: stark steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 24 € (Neuwarenwert) Gesamt: 580.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 439 Demontagebetriebe (Quelle ear-Portal 2018)) 55kg Magnete / Jahr 1,1 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	1.320 € Umsatz / Jahr 28 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	1 Stunde pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Antriebskörper ca. 150 g Magnet (Groke et al. 2017 S. 251) Magnetwert pro Antriebskörper ca. 3,6 € (Neuwarenwert) Zusätzliche Erlösmöglichkeiten durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Kupfer-, Aluminium- und Eisenfraktionen.

Tabelle 35: Mengengerüst Magnete aus Nabendynamos in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenzugangs der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 5 t Magnete / Jahr Tendenz zukünftige Mengen: steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 24 € (Neuwarenwert) Gesamt: 200.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Wertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 1.000 Demontagebetriebe) 5 kg Magnete / Jahr 0,1 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	200 € Umsatz / Jahr 4,16 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Wertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	0,14 Stunden pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Dynamo ca. 39-87 g Magnet (abgeleitet aus Zeller et. al. 2016, S. 62f.) Magnetwert pro Dynamo ca. 0,5 - 1 € Zusätzliche Erlösmöglichkeiten durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Kupfer-, Aluminium- und Eisenfraktionen.

Industriemotoren

Industriemotoren werden an einer Vielzahl an Anfallstellen entweder als separierte Motoren oder als Teil größerer Maschinen und Anlagen entsorgt oder sie fallen bei Wartungs- und Reparaturbetrieben an. Soweit sie in den Anwendungsbereich des ElektroG fallen (vgl. dazu unter 2.3.2.1.1), werden sie von dort den Elektroaltgeräte-Erstbehandlern zugeführt. Bei größeren Motoren bauen diese bereits heute häufig Rotoren aus, um zur Erzielung besserer Erlöse Kupferwicklungen zu isolieren. Insbesondere bei kleineren Motoren findet dies aber nicht statt.

Die Abtrennung von NdFeB-Magneten oder NdFeB-Magnete-haltigen Rotoren würde im Regelfall bei Erstbehandlern erfolgen, von denen sie dann an die zentrale Aufbereitung weitergegeben werden. Tabelle 36 zeigt das Mengengerüst hierzu.

Tabelle 36: Mengengerüst Magnete aus Industriemotoren in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Verarbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 60 t Magnete / Jahr Tendenz zukünftige Mengen: steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 43 € Gesamt: 2,58 Mio. € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Wertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 1.000 Demontagebetriebe) 60 kg Magnete / Jahr 1,25 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	2.580 € Umsatz / Jahr 54 € / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Wertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	1,9 Stunden pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Motor ca. 0,05 bis mehrere hundert kg; angenommener Durchschnittswert: 175 g (Buchert et. al. 2014, S. 34) Magnetwert pro Motor (bei 175 g Magnetgewicht) ca. 7,5 € Zusätzliche Erlösmöglichkeiten durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Kupfer- und Aluminiumfraktionen.

Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher

Die Erfassung der Elektroaltgeräte erfolgt bei Tausenden von kommunalen oder privatwirtschaftlichen Sammelstellen nach ElektroG. Von dort werden sie an Elektroaltgeräte-Erstbehandler abgegeben. Die Abtrennung von NdFeB-Magneten oder NdFeB-Magnet-reichen Sortierfraktionen (z.B. magnethaltige FE-Fraktion) würde bei Erstbehandlern erfolgen, von denen sie dann an die zentrale Aufbereitung weitergegeben werden. Tabelle 37 zeigt die Mengengerüste hierzu.

Tabelle 37: Mengengerüst Magnete aus Festplatten, Kopfhörern und Lautsprechern in Deutschland 2020 (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 275 t Magnete / Jahr Tendenz zukünftige Mengen: sinkend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Magnet entspricht ca. 22 € Gesamt: 6,1 Mio. € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 439 Demontagebetriebe (Quelle ear-Portal 2018)) 626 kg Magnete / Jahr 213 kg Magnete / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	13.772 € Umsatz / Jahr 287 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	10,20 Stunden pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Magnetmenge pro Festplatte ca. <3 g (ältere Festplatten bis ca. 25 g) (Buchert 2014, S. 11) Magnetwert pro Festplatte ca. 0,04 -0,2 € (bei älteren Festplatten bis ca. 0,55 €) Magnetmenge pro Kopfhörer ca. 4,6 g (Sander et al. 2012, S. 58) Magnetwert pro Kopfhörer ca. 0,1 € Magnetmenge pro Lautsprecher ca. 17g (Sander et al. 2012, S. 58) Magnetwert pro Lautsprecher ca. 0,4 €

2.4.3.5 Bündelungsebene und Motivationslage

In welcher Form soll gebündelt werden (Bündelungsebene)

Die Bündelung sollte je nach Auslegung des Verwertungspfades entweder in Form separierter NdFeB-Magnete erfolgen und/oder soweit möglich in Form separierter NdFeB-magnethaltiger Rotoren.

Die Separationstiefe, in der Magnete vom einzelnen Erstbehandler zweckmäßigerweise weitergegeben werden, hängt aber nicht nur vom Verwertungspfad selbst ab, sondern auch je nach Erstbehandler vom dortigen Mengenaufkommen, von der technischen Ausstattung, vom Kenntnisstand der Mitarbeiter und von den aktuellen Marktpreisen für Schrotte, Kupfer und Magnetmaterial. Ein erfolgreiches Verwertungssystem wird diesen Randbedingungen gegenüber eine gewisse Flexibilität aufweisen müssen.

An welchen Stellen in der Prozesskette sollte gebündelt werden

Abbildung 9 zeigt mögliche Bündelungsstellen in der Verwertungsprozesskette. Grundsätzlich empfiehlt sich eine Bündelung bei den Betrieben, die Magnete oder magnethaltige Bauteile, wie z.B. Rotoren aus verschiedenen Einsatzbereichen ausbauen. Je nach Herkunft weisen die Magnete unterschiedliche Zusammensetzungen und Verunreinigungen auf. Sie können gemeinsam zur Aufbereitung transportiert werden, sofern es sich um Mengen handelt, die dort angenommen werden. Sie sollten dabei aber getrennt verpackt werden, um sie unterschiedlichen Prozessen der Qualitätskontrolle und Aufbereitung zuführen zu können. Die Zusammenführung solcher Teilmengen muss dem Aufbereiter bzw. den Aufbereitern selbst überlassen werden, denn die Steuerung der Verarbeitungsprozesse wird je nach Marktlage, technischer Ausstattung und Anforderungen der Abnehmer des Aufbereiters angepasst werden müssen.

Die Marktakteure und ihre Motivationslage

Eine größere Zahl von Unternehmen hat sich an Forschungsprojekten zum Thema beteiligt (s. z.B. Bast et al. 2014; Völker und Weckerle 2015; Auerbach et al. 2017; Elwert et al. 2018; Repromag 2018). Viele dieser Aktivitäten wurden in der Zeit um die Jahre 2010/2011 herum geplant oder begonnen, die von extrem hohen Seltenerdmetallpreisen gekennzeichnet war. Heute wie auch vor dieser Zeit liegen die Preise etwa um einen Faktor zehn darunter, bei jedoch wieder steigender Tendenz. Dennoch sind auch heute Unternehmen in diesem Feld aktiv. Allerdings handelt es sich dabei in der Regel um Ansätze, die auf bestimmte Produkte oder Marktsegmente fokussiert sind.

Es stellt sich somit die Frage, von welcher Gruppe der Marktakteure am ehesten die Initiative zum Aufbau einer Bündelungs- und Verwertungslösung zu erwarten sein könnte. Hierzu sollen die Interessenlagen der wichtigsten Marktteilnehmergruppen skizziert werden:

- **Magnethersteller:** Hersteller von NdFeB-Magneten könnten im Aufbau eines Sammel- und Verwertungssystems eine Möglichkeit sehen, an kostengünstigere Rohstoffe zu gelangen. NdFeB-Magnete werden aber weit überwiegend außerhalb Europas hergestellt. Der aktive Aufbau von Erfassungs- und Verwertungslösungen in Deutschland und Europa ist von dieser Akteursgruppe kaum zu erwarten. Zudem gehört die Abfallwirtschaft nicht zum Kerngeschäft von Magnetherstellern.
- **Hersteller magnethaltiger Produkte:** Das Interesse von Herstellern an der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Magneten ist schon deshalb eher gering, weil sie selbst meist nicht diese Rohstoffe einsetzen, sondern fertige Motoren oder Magnete beziehen. Interesse am Aufbau einer Erfassungs- und Verwertungslösung könnten am ehesten Einzelbranchen oder große Hersteller entwickeln, die Produkte mit großen Magneten und großem, künftig wachsendem Mengenpotenzial herstellen und selbst warten oder über Leasingkonzepte vertreiben. So wird auf Herstellerseite im Bereich der Elektromobilität bereits über eine Stärkung des eigenen Vermiet- oder Leasinggeschäftes nachgedacht. Die Verwertung von NdFeB-Magneten wird dabei aufgrund ihrer wertmäßig eher geringen Bedeutung allerdings nicht der entscheidende Faktor sein. Denkbar wäre, dass diese Magnete im Rahmen einer generellen Produktrücknahme- und Verwertungsstrategie mit adressiert werden (vgl. dazu im Detail unter 2.3.2.7). Derzeit erscheint dies jedoch noch wenig realistisch. Der proaktive Aufbau eines branchenübergreifenden Erfassungs- und Verwertungssystems für NdFeB-Magnete durch Herstellerbranchen ist schon aufgrund des hohen Koordinationsaufwandes kaum zu erwarten.
- **Demontageunternehmen:** Haben die magnethaltigen Abfälle ohnehin in ihrem Besitz und könnten die Separation und Aufbereitung von NdFeB-Magneten als weitere Erlösquelle betrachten. Sie verfügen jedoch jeweils nur über beschränkten Mengenzugriff. Auch gehören weder der Aufbau von Erfassungssystemen und komplexer Logistikdienstleistung noch der Betrieb komplexer metallurgischer Rückgewinnungs-Prozesse zum Kerngeschäft typischer Erst-

behandler. Im Falle des Aufbaus eines solchen Geschäftes wären zudem ihre Konkurrenten zugleich ihre Zulieferer. Dies ist eine denkbar schlechte Voraussetzung für Geschäftserfolg. Isolierte Aktivitäten in geringem Umfang, etwa der Ausbau und Weiterverkauf größerer Magnete an Händler, sind hier durchaus denkbar. Eine umfassende und übergreifende Initiative erscheint aber aus dieser Gruppe wenig realistisch.

- **Logistikunternehmen:** Grundsätzlich verfügen entsprechend spezialisierte Logistiker über einen guten Zugang zu Erstbehandlern. Sie haben jedoch in der Regel weder eigene Erfahrungen im Bereich der Erstbehandlung noch gar im Betrieb komplexer Recyclingprozesse. Ihr Kerngeschäft wäre beim Aufbau eines solchen Angebotes kein wesentlicher Erfolgsfaktor. Auch sie kommen daher als Initiatoren kaum in Frage.
- **Händler / Makler:** Spezialisierte Unternehmen aus dieser Gruppe kaufen schon heute je nach Marktlage NdFeB-Magnete für den Export ein. Sie erhalten im Wesentlichen solche Ware, deren Gewinnung (also in der Regel Ausbau) mit so wenig Aufwand verbunden ist, dass sie eine hinreichend interessante Vergütung zahlen können. Damit dürften sie vor allem leicht ausbaubare große Magnete erfassen, was wiederum für andere in diesem Feld künftig tätige Akteure die wirtschaftlich interessantesten Mengen mindert. Es ist aber nicht zu erwarten, dass Händler oder Makler ein umfassenderes Verwertungssystem aufbauen. Weder verfügen sie über die hierzu erforderlichen Schlüsselkompetenzen noch wäre ihr Kerngeschäft dabei ein wesentlicher Erfolgsfaktor.
- **Betreiber verfahrenstechnisch komplexer nasschemischer oder metallurgischer Recyclingprozesse:** Haben Erfahrungen im Betrieb solcher Prozesse. Haben aufgrund ihrer Erfahrungen die Möglichkeit entsprechende Aufbereitungsangebote zügig aufzubauen und somit die Chance, Erster in einem Markt zu sein, der für weitere Aufbereiter kaum Platz bietet. Das Geschäft passt je nach bisherigen Aktivitäten zu ihrem Kerngeschäft. Auch für sie besteht dabei ein erhebliches Erfolgsrisiko, dennoch erscheinen sie am ehesten motiviert und geeignet für den Aufbau eines entsprechenden Geschäftsfeldes.

Selbstverständlich sind auch übergreifende Kooperationen verschiedener Akteure denkbar und wahrscheinlich. Aber auch Kooperationen müssen von jemandem initiiert und vorangetrieben werden. Zudem ist die dargestellte Rollenverteilung idealisiert. So gibt es etwa durchaus Verwerter, die auch als Händler oder Logistiker tätig sind.

2.4.3.6 Informationsbedarf

Der Informationsbedarf der Akteure von anderen Akteuren hängt vom Abfallstrom sowie von Art und Rahmenbedingungen der Umsetzung ab und muss im konkreten Falle unter Einbindung der Beteiligten bestimmt werden. Im Herbst 2017 wurde im Rahmen des Projekts der Workshop „Informationsbedarf und –bereitstellung“ durchgeführt. Darin wurde mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern für die Abfallströme NdFeB-Magnete (siehe unten) und Fahrzeugelektronik (siehe Abschnitt 2.4.4.5) herausgearbeitet, welche Informationen die „Erstbehandler“, die „Logistiker“ und die „Verwerter“ für eine effiziente Behandlungs- und Verwertungskette benötigen. Die Bewertungen, die im Rahmen der Unter-Arbeitsgruppe zu NdFeB-Magneten mit 10 Teilnehmerinnen und Teilnehmern gesammelt wurden, sind in Tabelle 38 (Informationsbedarf der Erstbehandler), Tabelle 39 (Logistiker) und Tabelle 40 (Verwerter) zusammengefasst. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben jede Information mit „unverzichtbar“, „nice to have“ oder „unnötig“ bewertet. Außerdem wurden sie gebeten, zu jedem Informationsblock anzugeben ob sie sich gut in der Praxis auskennen. Die Tabellen zeigen in der Spalte „erforderlich?“ jeweils die deutliche Mehrheitsmeinung. Unter Gegenstimmen ist die Anzahl der gegensätzlichen Einschätzungen durch Sachkenner angegeben.

Tabelle 38: Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Erstbehandler gegenüber anderen Akteuren haben.

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu NdFeB-Magneten mit 10 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner; Hinweis: in dieser Gruppe fanden sich maximal drei Praxiskenner; die Bewertungen sind daher überwiegend nicht von Praxiskennern bestimmt

Informationen zur Demontage	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Welche Produkte enthalten NdFeB Magnete?	nein	1
Art und Position der Magnete - typische je Produktgruppe	kein klares Ergebnis	
Art und Position der Magnete - produktspezifisch	nein	1
Sind die Magnete gekapselt / vergossen / verklebt?	nein	1
Demontageanweisungen	ja	--
Sicherheitshinweise	ja	--
Informationen zur Bewertung		
Ausbauwürdigkeit (Aufwand/Erlös)	ja	--
Zeitaufwand Demontage je Produkt (ggfs. qualitativ)?	ja	--
Masse der Magnete je Produkt	kein klares Ergebnis	
Enthaltene Seltenerdmetalle (z.B. NdPrDyFeB)?	ja	1
Gesamtbewertung Produkt	ja	--
Informationen zur Weitergabe		
Arbeitssicherheits- und Gefährdungshinweise (bzgl. magnetischer Eigenschaften)	ja	
Besondere Anforderungen an Transport und Lagerung (Abschirmung, Feuchtigkeit)	ja	
Abholbedingungen des Logistikers	ja	
Art des Behälters	ja	
Annahmebedingungen des Verwerters (z.B. Art und Qualitäten der Magnete)	ja	
Strategische Informationen		
Strategisch Anliefermärkte: zu erwartende Magnetmengen	ja	
Strategisch Absatzmärkte: zu erwartende Qualitätsanforderungen und Erlöse?	ja	

Tabelle 39: Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Logistiker gegenüber anderen Akteuren haben

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu NdFeB-Magneten mit 10 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner; Hinweis: in dieser Gruppe fanden sich maximal drei Praxiskenner; die Bewertungen sind daher überwiegend nicht von Praxiskennern bestimmt

Informationen zur Abholung	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Abfallbezeichnung	ja	--
Kundendaten des Erstbehandler	ja	--
Abholort / Aufstellort	ja	--
Abholtage und Zeitfenster	ja	--
Masse oder Volumen der Abfallfraktion	ja	--
Tauschbehälter oder Entleerung z.B. in Sammelbehälter	ja	--
Behälter ID / Identifikationssystem	ja	--
Behälter Typ (Art, Maße) oder Transporthilfsmittel (z.B. Europalette)	ja	--
Besondere Anforderungen an Transport und Lagerung (Abschirmung, Feuchtigkeit)	ja	--
Arbeitssicherheits- und Gefährdungshinweise (bzgl. magnetischer Eigenschaften)	ja	--
Bearbeitungsstand	nein	--
Informationen zur Anlieferung		
Lieferung an (Firma, Ort, Anlieferstelle)	ja	--
Strategische Informationen		
Strategisch Abholung: Welche Mengen fallen wo an? Gibt es weitere Potenziale?	ja	--
Strategisch Ziele: wohin müssen die anfallenden Mengen geliefert werden?	ja	--

Tabelle 40: Informationsbedarf zu NdFeB-Magneten. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Verwerter gegenüber anderen Akteuren haben

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu NdFeB-Magneten mit 10 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner; Hinweis: in dieser Gruppe fanden sich maximal drei Praxiskenner; die Bewertungen sind daher überwiegend nicht von Praxiskennern bestimmt

Informationen zum Wareneingang	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Abfallbezeichnung	ja	--
Kundendaten des Anlieferers	ja	--
Masse Anliefercharge	ja	--
Anteil der Seltenerdmetalle an Masse Anliefercharge	ja	--
Enthaltene Seltenerdmetalle (z.B. NdPrDyFeB)?	ja	--
Prozentualer Anteil enthaltener Seltenerdmetalle (z.B. Nd ₂₄ Pr ₄ Dy ₂ FeB)?	ja	--
Art der Magnete (gesintert oder Polymermatrix)?	ja	--
Magnete korrosionsgeschützt (j/n)?	kein klares Ergebnis	
Waren die Magnete gekapselt / vergossen / verklebt?	nein	--
Bearbeitungsstand	ja	--
Arbeitssicherheitshinweise	Ja	--
Informationen zur Weitergabe		
Annahmebedingungen Folgeverwerter (Qualitätsforderungen und Erlöse)	ja	--
Strategische Informationen		
Anliefermärkte: zu erwartende Mengen, Qualitäten und Preise?	Ja	--
Absatzmärkte: zu erwartende Bedarfe, Qualitätsanforderungen und Erlöse?	ja	--
Neue Technologien*	ja	--

In der Diskussion wurden im Workshop vom 15.09.2017 unter anderen folgende Auffassungen vertreten:

- Demontage:
 - Ein Teilnehmer gab zu bedenken, dass manche Produkte eine sehr hohe Komplexität aufwiesen. So enthalte ein Pkw 15- 20 kleine Elektromotoren, die in Größe, Ausbauraufwand und Seltenerdmetallgehalt stark differieren. Dies führe zu einem so großen Umfang an Informationen, dass diese nur schwer lieferbar und verwertbar seien. Möglicherweise sei es eher sinnvoll, die Information zu geben, welche Bauteile ausgebaut werden sollen, und zu gewährleisten, dass im weiteren Verwertungsverlauf die dann erforderlichen Informationen einfließen.
 - Dagegen wurde eingewendet, dass wenn der Ausbau optimiert werden solle, auch diese Information erforderlich seien, um dem Demontagebetrieb den Demontageanreiz transparent zu machen.

- In jedem Falle müsse mit dem Informationsbedarf zu komplexen und eher einfachen Produkten unterschiedlich umgegangen werden.
- Logistik
 - Strittig blieb, ob Logistiker strategische Informationen selbst beschaffen müssen bzw. wer diese liefern soll. Klar sei aber, dass ein Logistiker, der strategisch agieren will, diese Informationen benötigt.
- Verwerter:
 - Die Seltenerdmetallzusammensetzung sei erforderlich, weil Dysprosium mit relativ geringerem Masseanteil ein preislich relevanter Anteil sei.
 - Fraglich sei allerdings, ob andere diese Information bereitstellen müssen bzw. können; in jedem Fall müsse der Verwerter Material auch selbst beproben.

2.4.3.7 Szenario für ein mögliches marktgetriebenes Erfassungs- und Bündelungskonzept

Ein marktgetriebener Aufbau umfassenderer Aktivitäten zur Erfassung und Verwertung von NdFeB-magnethaltigen Abfällen könnte beispielsweise nach folgendem Szenario geschehen: Der Markt sowie parallel die eingesetzte Prozesstechnik, Logistik und Kooperationsstruktur werden sukzessive und aktiv aufgebaut, getrieben durch einen Verwerter, der Magnete zu marktfähigen Produkten aufbereitet. Zur Motivation des Verwerter als Treiber siehe Abschnitt 2.4.3.5.

- Einstieg
 - Fokus auf einfach verwertbare, leicht zugängliche Magnete mit definierter Zusammensetzung und sicherem Absatz
 - Wiedereinsatz von Magneten
 - Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage zur Aufbereitung definierter, sauberer Magnete zum Wiedereinsatz der Legierungen (Zerkleinerung, Wasserstoffbehandlung, Jetmühle)
 - Gezielte Kooperation mit Anfallstellen für größere Magnetmengen (Motorenaufbereiter, Rücknahmesysteme von Herstellern, größere Altgeräteaufbereiter)
 - Suche nach Abnehmern für Magnete und Magnetlegierungen insbesondere in Segmenten mit eher geringeren Anforderungen
 - Über Pilotbetrieb hinaus keine Verarbeitung, wenn deutlich höhere Erlöse durch Weiterverkauf möglich
 - Ankauf ganzer Rotoren aus bestimmten Produktsegmenten, je nach Marktpreisen mit Zahlung etwas höherer Schrottvergütung
 - Kontakt zu möglichen Abnehmern für Seltenerdmetallkonzentrate
- Ausbau bei erfolgreichem Einstieg und absehbar hinreichendem Mengenaufkommen
 - Pilotanlage zur nasschemischen Aufbereitung kleinerer definierter Mengen
 - Kooperation mit weiteren Anfallstellen (später auch im Ausland)
 - Kooperation mit Systemlogistiker
 - Kooperation mit Abnehmern für Seltenerdmetallkonzentrate
 - Entwicklung von Behältersystemen für die Logistik
 - Ausbau des Entmagnetisierungsprozesses

- Stufenweise Entwicklung und Aufbau automatischer Analyse (und Sortierung) von Magneten
- Produktionsanlage zum Wiedereinsatz der Legierungen
- Produktionsanlage zur nasschemischen Aufbereitung
- Chancen
 - Einstieg in einen weitgehend unbesetzten Markt
 - Sammlung von Erfahrungen und Kooperationsaufbau zunächst ohne sehr große Investitionen
 - Marktbildung aus heutiger Sicht wahrscheinlich, sobald größere Mengen an insbesondere Altgeräten mit großen Magneten (z.B. Elektrofahrzeuge oder große Motoren) entsorgt werden
 - Voraussichtlich Wachstumsmarkt
- Risiken
 - Hohe Investitionskosten spätestens bei Ausbau der Aktivitäten
 - Höhe Vergütung an Erstbehandler vs. Lieferbereitschaft / Lieferqualität
 - Abnahmebereitschaft/-konditionen Verwerter von Seltenerdmetallkonzentraten (Abhängigkeit!)
 - Preisschwankungen für Seltenerdmetalle
 - Änderungen an Magnet-Rezepturen, Produktdesign etc.
 - Konkurrenz durch andere (auch internationale) Verwerter und Makler
- Unterstützend könnten eher behutsame staatliche/regulatorische Maßnahmen wirken, die nicht erheblich in den Markt eingreifen
 - Gezielte Wirtschaftsförderung in Form einer Zuschussförderung für Aufbau und Testbetrieb der Pilotanlage für die Gewinnung von Legierungen zum Wiedereinsatz, der nasschemischen Pilotanlage, der Entmagnetisierungsanlage und der Sortieranlage
 - Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung eines Langzeit-Zwischenlagers durch das Unternehmen (s. hierzu auch Kapitel 3.3.4).
 - Kennzeichnungspflicht für Magnete (s. unten)
 - U.U. Ausbau- und Verwertungspflicht (s. unten)

Trotz aller Schwierigkeiten erscheint die Umsetzung einer marktgetriebenen Realisierung möglich. Ehe solche Aktivitäten intensiviert werden, muss jedoch der Rücklauf an Geräten, die NdFeB-Magnete enthalten, noch erheblich zunehmen. Erst wenn größere Mengen zeitlich in Reichweite sind, ist damit zu rechnen, dass sich Unternehmen über Forschungsprojekte und Tastversuche hinaus wesentlich engagieren.

2.4.3.8 Regulatorische Maßnahmenoptionen

Sollte ein regulatorisch getriebener Ansatz realisiert werden, so sind folgende, überwiegend zunächst im europäischen Recht zu verankernde Regelungen denkbar und werden im Folgenden auf Zweckmäßigkeit untersucht. In Kapitel 5.2 erfolgt eine Zusammenfassung und vergleichende Bewertung der möglichen zweckmäßigen Maßnahmen.

- **Kennzeichnungspflicht**

Art der Kennzeichnung

Eine Kennzeichnung der Magnete selbst erscheint nicht zielführend, da diese erst nach dem Ausbau erkennbar/auslesbar wäre.

Besser geeignet: Kennzeichnung von Motoren (oder anderen Anwendungen wie Überbandmagneten) z.B. auf dem Typenschild.

Zu kennzeichnen wären Motoren bzw. Geräte mit nicht motorengelassenen Magneten (z.B. Überbandmagneten), die Einzelmagnete größer als z.B. 20g enthalten oder eine Gesamtmenge größer als z.B. 200 g.

Die Möglichkeit der Einführung einer Kennzeichnungspflicht, z. B. über das ElektroG bzw. die WEEE-RL (vgl. dazu bereits unter 2.3.2.5) oder über die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG bzw. für Motoren über die EG-Motorenverordnung, wäre zu prüfen; soweit zweckmäßig auch die Ausweitung auf weitere Produkte. Eine detaillierte Prüfung solcher oder anderer Handlungsmöglichkeiten im Bereich des Produkterechts ist jedoch nicht Gegenstand dieser Studie.

Der Kennzeichnungs-Code sollte vorgegeben werden und den Magnettyp angeben (z.B. NdFeB), ggfs. erweitert mit Angabe aller in Anteilen von mehr als 1 Gew.-% enthaltenen Seltenerdmetalle (z.B. NdPrDyFeB).

Die zusätzliche Angabe von Konzentrationen (z.B. Nd₂₄Pr₄Dy₂FeB für Magnete, die 24 Gew.-% Neodym, 4 Gew.-% Praseodym und 2 Gew.-% Dysprosium enthalten) erscheint nicht zweckmäßig, weil diese Information nicht direkt mit dem Magneten verknüpft ist und damit im Recyclingprozess ohnehin nicht genutzt würde. Zudem kann es hier zu Konflikten mit Schutzrechten kommen.

Zu prüfen wäre, ob die Kennzeichnung auch eine Unterscheidung von polymergebundenen und Sinter-Magneten ermöglichen sollte.

Hinweis: Bei Realisierung einer automatischen Sortierung könnte die Kennzeichnung sehr einfach gehalten werden (z.B. NdFeB), weil die Zusammensetzung ohnehin automatisch analysiert würde.

Hinweis: Ggfs. wären alle Permanentmagnettypen der Kennzeichnungspflicht zu unterwerfen. Dies hätte den Vorteil, dass auch der vermehrte Einsatz anderer seltenerdmetallhaltiger Magnettypen erfasst wäre und Ausweichbewegungen durch Wechsel des Magnettyps vermieden würden.

- **Pflicht, Magnete auszubauen und einer Verwertung zuzuführen**

Für Motoren bzw. Geräte mit nicht motorengelassenen Magneten (z.B. Überbandmagneten), die als NdFeB-haltig erkennbar (z.B. in Festplatten) oder, wie oben beschrieben, gekennzeichnet sind, könnte eine Pflicht zum Ausbau der Magnete definiert werden.

Zusätzlich wäre eine Verpflichtung erforderlich, die ausgebauten Magnete einer Verwertung zuzuführen, durch die Seltenerdmetalle ersetzt werden.

Verankert werden könnten die Verpflichtungen für Elektroaltgeräte in der WEEE-RL (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4), siehe Abschnitt 2.3.3.2.2, und für Altfahrzeuge in der EG-Altfahrzeugrichtlinie (Anhang I Nr. 4) bzw. in der deutschen Altfahrzeugverordnung (Anhang Punkt 3.2.3.3), siehe Abschnitt 2.3.3.1.

Sollten dort Anforderungen für das Ausschleusen von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen festgelegt werden, müssen die Hersteller entsprechende Demontagehinweise zur Verfü-

gung stellen. Zu prüfen: Ausbau bestehender Initiativen zur Etablierung einer zentralen, ggf. internetbasierten Demontagehinweisedatenbank (www.i4r-plattform.eu).

- Hinweis: Eine Pflicht zum Ausbau ist nur dort zielführend, wo eine Kennzeichnungspflicht besteht oder, z. B. aufgrund der Demontagehinweise, das Vorhandensein von NdFeB-Magneten bekannt ist. Gegebenenfalls kann in die genannten Regelwerke eine Formulierung aufgenommen werden wie „... sind auszubauen, aus Geräten, die entsprechend gekennzeichnet sind, oder bei denen das Vorhandensein NdFeB-haltiger Magnete allgemein bekannt ist“.
- **Verpflichtung zum verwertungsgerechten Design**

Viele Magnete sind nicht unzerstört ausbaubar (z.B. eingeklebte und/oder bandagierte Magnete). In solchen Fällen hat ein Demontagebetrieb keine Möglichkeit, die Ausbauvorgabe mit vertretbarem Aufwand und angemessenem Ergebnis zu erfüllen.

Zu prüfen wäre, ob für einzelne Anwendungsbereiche eine Design-Vorgabe „Magnete müssen mit einfachen Mitteln unzerstört ausgebaut werden können“ unter Abwägung aller Gesichtspunkte vertretbar erscheint. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass es hier zu Zielkonflikten mit Energie- und Materialeffizienz kommt. Auch hier wären ggfs. Möglichkeiten zur Verankerung im Rahmen der erweiterten Hersteller- und Produktverantwortung zu prüfen (vgl. für Abfallströme, welche nicht unter WEEE-RL bzw. ElektroG fallen, zu den nunmehr vorgesehenen Ergänzungen des Art. 8 AbfallRL, welche ggf. auch zu Änderungen der §§ 23 ff. KrWG führen können, Rat der Europäischen Union, 2015/0275 (COD), 6516/18 vom 23.02.2018, S. 40 ff.).

Wenn eine solche Vorgabe nicht vertretbar ist, dann muss auch die Verpflichtung zum Ausbau entsprechend eingeschränkt werden, z.B. „Ausbau, sofern technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und unter Beachtung der sozialen Folgen“. Ob der Aufwand vertretbar ist, könnte in technischen Leitlinien anhand von Kriterien oder Bauteillisten beschrieben und regelmäßig aktualisiert werden.

- **Verwertungsquote**

Die gesetzliche Festlegung einer sondermetallbezogenen Verwertungsquote für NdFeB-Magnete aus Elektrogeräten oder Altfahrzeugen, z. B. in ElektroG oder AltfahrzeugV, bzw. in der WEEE-RL oder der EG-Altfahrzeugrichtlinie mit Bezug auf die in Verkehr gebrachte Menge ist, wie bereits unter 2.3.2.4 und 2.3.3.2 dargestellt grundsätzlich möglich, aber nicht zweckmäßig, da Magnete zu erheblichen Teilen in Motoren bzw. Maschinen verbaut importiert werden und damit ihre Mengen nicht bekannt und angesichts der Vielzahl an Produktvarianten allenfalls mit großem Aufwand fundiert abschätzbar sind. Sie ist daher allenfalls mit großem Aufwand zu überwachen, denn hierzu müssten sowohl die separierten und der Verwertung zugeführten Mengen als auch die Ausbeuten der Verwertungsprozesse ermittelt und zusammengeführt werden (vgl. daher die Möglichkeit einer entsprechenden Anpassung der Mitteilungspflichten in ElektroG und AltfahrzeugV). Vgl. Kapitel 2.3.2.4.2 und 2.3.3.2.1).

- **Verpflichtung zu Aufbau eines Rücknahme-/Verwertungssystems**

Die separierten Magnete müssen vom Zerlegebetrieb zum Magnetverwerter gelangen. Hierzu sind Transportsysteme erforderlich, die eine Abschirmung der Magnete untereinander und gegen andere Magnete gewährleisten. Zudem sind die abzuholenden Mengen oft klein und sie stammen aus einer Vielzahl von Quellen. Aus diesem Grund könnte eine gesetzliche Verpflichtung zu Aufbau und Betrieb eines Rücknahme- und Verwertungssystems in Frage kommen.

Ein solches System hätte einige Vorteile gegenüber direkten Lieferbeziehungen zwischen Zerlegebetrieb und Endverwertern: durch aktives Einsammeln auch von Kleinmengen kann der Mengenrücklauf gesteigert werden, alle Beteiligten würden ein kontrolliertes Behälter- und

Logistiksystem nutzen, die Logistik kann Transporte effizienter organisieren und es würden auch Abholungen erfolgen, die für ein kommerzielles System unwirtschaftlich sind. Das System würde zudem auch die Verwertungsqualität kontrollieren und müsste die Durchführung der Verwertung sicherstellen, und zwar auch in Phasen niedriger Rohstoffpreise.

Zum Aufbau eines solchen Rücknahme- und Verwertungssystems verpflichtet werden könnten Hersteller von Motoren oder anderen Produkten, die Magnete enthalten.

Für den Bereich der NdFeB-Magnet-haltigen Elektro- und Elektronikaltgeräte bietet sich zunächst eine Verankerung im ElektroG bzw. in der WEEE-RL an.

Sofern über den Anwendungsbereich des ElektroG hinaus auch die Zulieferer von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren (soweit diese nicht selbst als Hersteller von Elektro- oder Elektronikgeräten einzustufen sind) oder von sonstigen NdFeB-Magnet-haltigen-Bauteilen sowie die Hersteller der NdFeB-Magneten selbst verpflichtet werden sollen, ist eine Regelung außerhalb des ElektroG erforderlich (vgl. dazu bereits unter 2.3.2.7 und 2.3.4).

Damit wären nahezu alle wesentlichen Produktgruppen abgedeckt, in denen NdFeB-Magnete eingesetzt werden. Aufbau, Koordination und Überwachung eines solchen Systems wäre jedoch mit sehr großem Aufwand verbunden. Eine solche Lösung kann daher nicht empfohlen werden.

Eine Übertragung der Aufgabe an die stiftung ear (unter dem ElektroG) erscheint ebenfalls nicht zielführend. Aufgabe der ear ist nicht der Aufbau und Betrieb von Rücknahme- und Verwertungssystemen, sondern die Koordination und das Monitoring von Abholungen, die jeweils durch Hersteller beauftragt werden.

Es wäre somit eine spezifische gesetzliche Regelung erforderlich, die sich an Inverkehrbringer von NdFeB-magnethaltigen Produkten richtet. Hier könnte eine Verpflichtung zum Aufbau eines Rücknahme- und Verwertungssystems niedergelegt werden, die ähnlich der Verpflichtung der Hersteller von Gerätebatterien in § 6 BattG ausgelegt ist. Wenn Steuerungsadressat die Hersteller von FeNdB-magnethaltigen Produkten sind, dann ist der Koordinationsaufwand für ein solches System angesichts der im Vergleich zur Zahl der Batteriehersteller immensen Vielzahl und Vielfalt der Verpflichteten sehr hoch. Eine Verpflichtung von Magnetherstellern allein wäre nicht zielführend, da ein großer Teil der Magnete eingebaut in Motoren und Geräten nach Europa gelangt. Zusätzlich wären daher Importeure solcher Geräte zu verpflichten.

- **Förderung der Verwertung ohne direkte Verpflichtung**

Für NdFeB-Magnete oder Teile, die z.B. zu mindestens 10% aus NdFeB-Magneten bestehen, könnte die Möglichkeit zur Einrichtung und Unterhaltung privatwirtschaftlich betriebener Langzeitzwischenlager geschaffen werden. Dazu wären Änderungen der Anforderungen an die Langzeitlagerung in § 23 DepV erforderlich (s. Kapitel 3.5.2.2).

In jedem Falle förderlich ist die Steigerung von Rücklaufmengen (Altfahrzeuge, Elektroaltgeräte) etwa durch Stärkung des Vollzugs, weil dies automatisch auch das Mengenpotenzial an NdFeB-Magneten steigern würde.

Eine weitere Möglichkeit wäre die steuerliche Bevorzugung von Recyclingprozessen.

2.4.3.9 Nicht regulatorische Maßnahmenoptionen für eine effizientere Logistik

- **Integration in Bündelungsworkshops** (s. Abschnitt 2.4.2.4): Die Einrichtung von Bündelungsworkshops ist erst dann zweckmäßig, wenn Abnehmer und Verwerter von NdFeB-Magneten aktiv sind oder dies in Kürze werden wollen. Im Rahmen der Workshops werden dann Möglichkeiten erarbeitet, bestehende Netzwerke zu nutzen: Unternehmen, die NdFeB-

Magnete gewinnen wollen, werden mit dem Verwerter und mit Logistik-Dienstleistern, die bereits Kleinmengen bei den Demontagebetrieben abholen, zusammengebracht. Dabei werden insbesondere NdFeB-Magnete-Gewinner aus unterschiedlichen Bereichen (v.a. IT- und Altfahrzeugdemontage) eingebunden. Ziel ist es, Lösungen zu finden und Vereinbarungen zu treffen, um heute bereits etablierte Abholtransporte zu nutzen. Dabei sind ggfs. die Besonderheiten des Transports von nicht entmagnetisierten Magnetschrotten zu berücksichtigen. In Bündelungsworkshops werden die logistischen Netze der einzelnen Akteure erarbeitet und „übereinandergelegt“. So werden parallel laufende Transportprozesse sichtbar und damit Bündelungspotenziale deutlich. Die Zusammenführung der NdFeB-Magnet-Transporte mit bestehenden Netzen zu einem Transportnetz kann helfen Kosten zu sparen. Motivation zur Teilnahme an einem Workshop kann es sein, diese Potenziale zu nutzen, um eine effiziente Logistiklösung aufzubauen. Für die Organisation der Bündelungsworkshops sollte Kontakt zu den betroffenen Verbänden aufgenommen werden. Es muss aber auch der Magnetverwerter einbezogen werden. Das Interesse von Unternehmen an solchen Aktivitäten ist am ehesten dann gegeben, wenn die Initiative von der eigenen Branche ausgeht.

- **Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“** zur Übertragung von Lean Management Ansätzen auf Demontageprozesse in der Recycling-Wirtschaft: Die Handreichung beinhaltet Aufwandreduzierung in der Demontage durch die Anwendung von bekannten Lean Management Konzepten.³⁴ Sie kann wirksam verbreitet werden durch Vorstellung in Verbänden und auf Fachveranstaltungen. Die Handreichung sollte sich nicht explizit auf NdFeB-Magnete beziehen, sondern aus übergeordneter Sicht formuliert sein und besonderes Augenmerk auf die Umsetzbarkeit für KMU legen. (vgl. Kapitel 2.2.4.2.1)
- **Integration von Informationen zu regelmäßig zu erwartenden oder gerätespezifischen** Verbauorten von NdFeB-Magneten zum Zweck eines gezielten und schnelleren Ausbaues in das oben (vgl. Kapitel 2.4.5.1) beschriebene **RWWS**. Die Daten hierzu können eigene Erfahrungswerte der Demontagebetriebe sein, aber auch aus anderen Quellen bezogen werden (z.B. Herstellerbranchen, Magneteaufbereiter, Kooperation von Demontagebetrieben).
- **Förderung der Entwicklung von Transport- und Behältersystemen** für nicht entmagnetisierte NdFeB-Magnetabfälle, insbesondere für große Magnete, für die die Nutzung etablierter Logistiknetze ohne wirksame Abschirmung nicht realistisch ist (Stapler, LKW Aufbauten, Lagerausstattung, z.T. Böden von Lagerhallen sind metallisch und würden über die Anziehungskraft zu erheblichen Prozessverzögerungen führen). Hierzu könnte ein Forschungsprojekt unter Beteiligung von Praxispartnern ausgeschrieben werden. Zunächst wäre zu prüfen, in welchem Maße Systeme geeignet sind, die schon heute zur Bereitstellung von Neu-Magneten eingesetzt werden.
- **Erfassungs- und Demontagenetzwerk Elektrofahrräder:** Während gebrauchsuntaugliche konventionelle Fahrräder üblicherweise über die Schrott-Sammlung entsorgt werden, müssen Fahrräder mit einer Treithilfe bis zu 25 km/h (sog. Pedelecs) der Elektroaltgerätebehandlung zugeführt werden (vgl. im Detail oben unter 2.4.3.4). Da es sich um eine recht junge Produktgruppe handelt, bei der nennenswerter Rücklauf erst in einigen Jahren zu erwarten ist, könnte es gerade hier zweckmäßig sein, den Aufbau eines Erfassungs- und Demontagenetzwerks zu prüfen. Hierzu könnte eine freiwillige Kooperation zwischen Herstellern, Händlern, Elektroaltgeräte-Erstbehandlern und interessierten Kommunen in Erwägung gezogen werden. Hersteller und Händler könnten zurückgenommene Pedelecs bündeln und – ggfs. spezialisierten - Elektroaltgeräte-Erstbehandlern zuführen. Auch Kommunen könnten im Rahmen des Netz-

³⁴ Vgl. Gorecki, Pautsch (2014)

werks separate Erfassungsmöglichkeiten für Pedelecs anbieten, etwa zum Zwecke der Prüfung auf Eignung für Aufbereitung und Wiedereinsatz. Bei vielen Fahrradhändlern ist über Fahrrad-reparaturdienstleistungen entsprechendes Knowhow verfügbar, das im Netzwerk nutzbar gemacht werden könnte. Über gestaffelte Rücknahmeprämien könnte zudem die Erfassung von für Weiterverkauf – z.B. durch beteiligte Händler - und Gebrauchtteilengewinnung durch den Elektroaltgeräte-Erstbehandler besonders geeigneten Fahrrädern gezielt verbessert werden. Da anzunehmen ist, dass Pedelec-Fahrer zu einem signifikanten Teil umweltsensibel sind, könnte das Netzwerk einen positiven Marketingeffekt haben. Die Grundidee zu dieser Maß-nahmenoption wurde während des im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Workshops „Bündelungslogistik“ am 10. Mai 2017 von einer Teilnehmergruppe entwickelt.

2.4.4 Edelmetallhaltige separierte Leiterplatten, Sensoren und Zündkerzen aus Altfahrzeugen

2.4.4.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Von Groke et al. (Groke et al. 2017) wurden Altfahrzeuge der Baujahre 2011 bis 2014 analysiert, die erst gegen 2025 in größeren Stückzahlen in die Verwertung gelangen werden. Die Untersuchung be-traf 114 Komponentengruppen, die allerdings nicht nur wegen ihrer Gehalte an Edelmetallen, sondern auch an Sondermetallen wie z.B. Neodym in die Auswahl gelangten. 30 Komponenten wurden vertieft analysiert. Auch die drei mit Blick auf die zu verbessernde Edelmetallausbeute zu betrachtenden Komponenten Leiterplatten aus Fahrzeugelektronik, Lambdasonden und Zündkerzen waren Gegen-stand der Analyse.

Für acht Komponenten wurde mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit eine Separationsempfehlung ausge-sprochen, darunter an edelmetallhaltigen Komponenten Lambdasonden und fünf leiterplattenhaltige Steuerungskomponenten. Zu weiteren neun Komponenten war eine eindeutige Entscheidung für oder gegen eine Demontage nicht möglich, darunter drei leiterplattenhaltige Steuerungskomponenten und zwei edelmetallhaltige Sensoren (Groke et al. 2017; S. 195). Zu einem Teil solcher ausgebauten Kom-ponenten gibt es bereits Kaufangebote am Markt; der mit Abstand höchste Preis mit 6,50 €/kg wird dabei wegen ihres Edelmetallgehaltes für Lambdasonden genannt. Aufgrund der geringen Masse liegt der Stückpreis allerdings nur bei knapp 50 Eurocent je Sonde (Groke et al. 2017; S. 158).

Die Elektroden der edelmetallhaltigen Zündkerzen weisen Zielmetallgehalte im Bereich von wenigen Milligramm je Zündkerze auf. Aufgrund des hohen Marktpreises erwarten die Autoren nur einen ge-ringen Marktanteil für diese Zündkerzen (Groke et al. 2017; S. 77).

Die über die Elektronikkomponenten verteilte Leiterplattenmenge je Altfahrzeug kann mit ca. 1 kg je Fahrzeug abgeschätzt werden, wobei es je nach Fahrzeugtyp auch hier erhebliche Unterschiede gibt. Auf Basis von für Leiterplatten eher optimistisch angenommenen Zielmetallgehalten ergibt sich für diese ein Neuwarenwerte von 9,54 €/kg Leiterplatten. Der Leiterplattenwert betrüge so 9,54 € je Fahrzeug.

Dies entspricht jedoch nicht der Vergütung, die ein Altfahrzeug-Demontagebetrieb tatsächlich erhalten würde, denn:

- Der Aufwand der Zwischenhändler und der Unternehmen in der weiteren Verwertungskette bis zur Gewinnung der Edelmetalle (Elektroaltgeräteaufbereiter, Kupferhütte) muss aus dem Erlös finanziert werden.
- Der Aufwand für die Kleinmengen-Abhollogistik muss aus der Vergütung finanziert werden. Auch wenn diese Abholung zugleich mit anderen Abfällen erfolgt, ist ein Teil des Gesamtauf-wandes aus dem Erlös zu finanzieren.
- Es kommt zu Verlusten in der Aufbereitungskette.

Dies erklärt, dass Groke et al. (Groke et al. 2017; S. 129 ff.) für Leiterplatten aus Altfahrzeugen Großhandelserlöse in Höhe von 2,80 €/kg ansetzen.

Vor allem aber können bei Weitem nicht alle Leiterplatten und Elektronikbauteile mit vertretbarem Aufwand ausgebaut werden. Das tatsächliche Erlöspotenzial pro Altfahrzeug liegt somit tatsächlich deutlich unter diesem Wert.

Das Gesamtpotenzial aus Leiterplatten liegt bei einem Rücklauf von derzeit ca. 500.000 Altfahrzeugen pro Jahr in Deutschland bei einem Neuwarenwert von 4,77 Mio. €/a. Davon ist durch Demontage ein Teil mit vertretbarem Aufwand zurückgewinnbar.

Bei der Potenzialabschätzung ist aber ferner zu berücksichtigen, dass schon heute Edelmetalle aus Schredderfraktionen zurückgewonnen werden. Über die Ausbeute liegen keine belastbaren Informationen vor. Schüler et al. schätzen sie mit 20 bis 25% ab (Schüler et al. 2017 S. 35).

Künftig ist mit einem vermehrten Einsatz von Elektronikkomponenten bei zunehmenden Anforderungen zu rechnen. Dies spricht zunächst für ein wachsendes Leiterplattenaufkommen. Da zugleich die Größen und Edelmetallgehalte von Leiterplatten unter anderem durch Miniaturisierung kontinuierlich sinken, ist für Altfahrzeuge aber dennoch nicht von einem wachsenden Edelmetallpotenzial aus Leiterplatten auszugehen.

Wie von Groke et al. (Groke et al. 2017) herausgearbeitet wurde, kann zudem zwar der Ausbau einer begrenzten Auswahl an Elektronik-Komponenten aus den Erlösen für das erhaltene Material wirtschaftlich sein. Die Zahl der Bauteile, für die eine Demontageempfehlung ausgesprochen wird, ist allerdings recht gering und die Ausbauzeiten können je nach Altfahrzeugtyp erheblich variieren.

Gezielt mit der Aufbereitung der Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen befassten sich Schüler et al. (Schüler et al. 2017). Diese Komponenten zeichnen sich durch eine hohe Konzentration von Elektronikfunktionen und damit von Leiterplatten und bei heutigen Fahrzeugmodellen durch vergleichsweise gute Zugänglichkeit aus. Durch das voraussichtlich starke Wachstum des E-Fahrzeugmarktes ist zudem in weiterer Zukunft mit wachsendem Aufkommen dieser Altfahrzeuge zu rechnen. Die Autoren haben das Aufbrechen der Gehäuse und Ablösen der enthaltenen Bauteile, insbesondere der Leiterplatten, mittels einer Prallmühle und mit anschließendem Aussortieren der Leiterplatten erprobt und geben – wohl eher optimistisch geschätzte - Edelmetallausbeuten von 98% an. Auch hier ist die Wirtschaftlichkeit nach Angaben der Autoren zwar gegeben, doch die Kosten-Erlösbilanz der Altfahrzeug-schredderroute erweist sich als wesentlich besser (Schüler et al. 2017; S. 37f.).

Ferner ist zu beachten, dass Kraftfahrzeuge - sowie Geräte, die in diese eingebaut sind und ohne unverhältnismäßigen Aufwand nicht von diesen getrennt werden können und ihre Funktion nur speziell als Teil des Kraftfahrzeugs erfüllen können - nicht dem ElektroG, sondern, soweit es sich um Fahrzeuge der Klasse M1 oder N1 sowie um dreirädrige Kraftfahrzeuge (und nicht bloße Krafträder) handelt, einschließlich ihrer Bauteile und Werkstoffe der Altfahrzeug-Verordnung unterfallen.

Neben dem Demontageaufwand besteht ein weiteres Hemmnis darin, dass je Altfahrzeugverwerter nur kleine Mengen an Fahrzeugelektronik oder Lambdasonden anfallen. Entsprechend lange dauert es, bis Sammelbehälter, wie etwa Gitterboxen voll sind und zur Abholung bereitgestellt werden könnten. Die mehrfache Abholung kleinerer Mengen übers Jahr würde aber zu deutlich größeren Logistikkosten führen. Aus der Branche wird berichtet, dass einige Altfahrzeugverwerter separierte Lambdasonden den Lieferungen an Aufbereiter edelmetallhaltiger Katalysatoren mitgeben, die einen guten Zugang zur Edelmetallrückgewinnung haben. In welchem Umfang dies geschieht, ist nicht bekannt.

Tabelle 41 gibt Einschätzungen zu weiteren im Zusammenhang mit einer möglichen Bündelung dieser Abfallströme relevanten Fragen.

Tabelle 41: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von edelmetallhaltigen Leiterplatten, Lambdasonden und Zündkerzen

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Ein großer Teil der endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge wird nicht in Deutschland entsorgt, dies wirkt sich direkt auf das Mengenpotenzial des Abfalls aus
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Die Erfassung von Altfahrzeugen kann mit Blick auf die hier betrachteten Abfallströme nicht in besser verwertungsgeeigneter Form erfolgen, eine Abtrennung der zu bündelnden Abfallströme findet derzeit nicht in nennenswertem Umfang statt
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, derzeit ist dieser Verwertungspfad nicht in nennenswertem Umfang realisiert, daher existiert keine Bündelungslogistik für die betrachteten Abfallströme
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	s.o.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Eine Vorseparation erfolgt derzeit nur zur Gewinnung von Gebrauchtteilen für den Wiederverkauf, diese erfolgt an geeigneter Stelle
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Altfahrzeugverwerter besitzen die erforderlichen Kenntnisse um Fahrzeugelektronik und andere edelmetallhaltige Bauteile auszubauen. Sie verfügen in der Regel nicht über Erfahrungen in der Zerlegung solcher Teile. Dies erscheint jedoch nicht erfolgskritisch. Es fehlen Kenntnisse darüber, welche Elektronikbauteile mit vertretbarer Aufwand/-Nutzen-Relation ausgebaut werden könnten und welche Erlöse für die separierten Gesamtmengen erzielt werden können.

2.4.4.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Zur Rückgewinnung von Edelmetallen aus Elektronikkomponenten können Prozesse der Elektronikschrottaufbereitung genutzt werden, die großenteils verfügbar sind. Diese unterteilen sich grob in zwei Prozessstufen

- Stufe 1: Aufbereitung von Elektro- und Elektronikgeräten. In dieser Stufe können im Wesentlichen drei Gruppen von Verfahren eingesetzt werden:
 1. Manueller Ausbau von Leiterplatten

2. Aufbrechen von Gehäusen und Freilegen der enthaltenen Leiterplatten und weiterer Komponenten z.B. in Prallmühlen oder anderen geeigneten Aggregaten mit anschließender manueller oder auch automatischer Sortierung
 3. Direkte Zufuhr zu für die Aufbereitung von Elektronikschrott ohne hochwertige Leiterplatten ausgelegte Schredder- und Separationsprozesse
- Stufe 2: Rückgewinnung der Edelmetalle aus den in Stufe 1 gewonnenen Leiterplatten oder edelmetallreichen Sortierfraktionen. Dieser Aufbereitungsschritt erfolgt in Kupferhütten (Hauptmenge) oder anderen metallurgischen Prozessen.

Dieser Prozesskette sollten edelmetallhaltige Abfälle aus Altfahrzeugen zugeführt werden soweit sie hierfür geeignet sind und dadurch wesentliche Verbesserungen der Edelmetallausbeute im Vergleich zur derzeitigen Schredderroute für Restkarossen zu erwarten sind. Verfahren, die etwa Prallmühlen zum Aufbrechen der Gehäuse verwenden, sind vermutlich derzeit nicht in Betrieb, könnten aber schnell realisiert werden.

Die direkte Aufbereitung von Leiterplatten, Sensoren und Zündkerzen auf Schredderanlagen für Elektroaltgeräte ist nicht zu empfehlen, da diese Anlagen zwar zu besseren Edelmetallausbeuten führen, der Unterschied aber zu gering sein dürfte, um den Einsatz einer weiteren Prozessstufe zu rechtfertigen.

Die manuelle Zerlegung der ausgebauten Fahrzeugkomponenten zur Separation von Leiterplatten ist aus wirtschaftlichen Gründen auch den Ergebnissen von Groke et al. (Groke et al. 2017) und Schüler et al. (Schüler et al. 2017) zufolge nicht zu empfehlen.

Das Aufbrechen von Gehäusen durch Prallmühlen o.ä. mit anschließender Sortierung sollte bei Elektronikschrott-Erstbehandlern erfolgen, die über entsprechende Technik verfügen und das Fahrzeugmaterial, evtl. kampagnenweise, dort mitverarbeiten. Zu beachten ist jedoch, dass es in Zerkleinerungsanlagen zu Schwierigkeiten durch flexible Vergussmassen kommen kann, die unter anderem als Erschütterungsschutz häufig auf Leiterplatten in Fahrzeugen eingesetzt werden.

Aufgrund der geringen Menge an edelmetallhaltigen Zündkerzen ist ein eigener Aufbereitungspfad nicht zweckmäßig. Grundsätzlich können Zündkerzen direkt in Kupferhütten verarbeitet werden, aufgrund des hohen Anteils an für Kupferhütten nicht nutzbaren Keramiken und Metallen und auch der geringen Gesamtmenge ist auch dies als Einzelfraktion nicht möglich. Ein direkter Zuschlag zu hochwertigen Leiterplattenfraktionen würde den Wert der Leiterplattenchargen mindern. Die Zuführung zu Schredderprozessen dürfte in der Regel zum Verlust der enthaltenen Edelmetalle führen weil diese sich in oder auf Elektroden befinden, die üblicherweise Nickel oder Eisen enthalten und so mitsamt den Edelmetallanteilen mit der Magnettrennung in die FE-Fraktion geraten. Es bedürfte also eigener angepasster Aufbereitungsprozesse. Solange solche Prozesse nicht verfügbar sind erscheint eine Separation von Zündkerzen daher nicht ratsam.

Lambdasonden werden aufgrund ihres vergleichsweise hohen Wertes zum Teil bereits heute ausgebaut und an Verwerter abgegeben. So wie auch bei der Separation von Fahrzeugelektronik und den darin enthaltenen Leiterplatten stehen also auch hier Verwertungsmöglichkeiten zur Verfügung. Die Herausforderung besteht somit nicht im Aufbau von Verwertungsverfahren sondern in der schlechten Wirtschaftlichkeit von Separation und Logistik.

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse.

Abbildung 10: Leiterplatten aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Fahrzeugelektronik (Leiterplatten) aus Altfahrzeugen			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Rücknahme von Altfahrzeugen	Behördlich anerkannte Annahmestellen und Rücknahmestellen	
2	Lokalisierung von ausbauwürdigen Steuergeräten / elektronischen Bauteilen	Altfahrzeugverwerter / Demontagebetrieb	
3	Ausbau der Fahrzeugelektronik	Manuelle Demontage	Wertdichte: 0,1 bis 4 €/kg
4	Entfernung grober Fremdmaterialien (manuell)	ca. 1 bis 7 min.	Wertdichte: 1 bis 8 €/kg
5	Zerkleinerung	Im Rahmen der Elektroaltgeräteaufbereitung	Wertdichte: 1 bis 8 €/kg
6	Sortierung	Abtrennung von bspw. FE-haltigen Komponenten, Kunststoff-Gehäuse, etc.	Wertdichte: max. 9,5 €/kg
7	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer Prozess)	Etabliertes Verfahren	

Abbildung 11: Lambdasonden aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Lambda-Sonden aus Altfahrzeugen			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Rücknahme von Altfahrzeugen	Behördlich anerkannte Annahmestellen und Rücknahmestellen	
2	Lokalisierung von ausbauwürdigen Lambda-Sonden	Altfahrzeugverwerter / Demontagebetrieb	
3	Ausbau der Lambda-Sonden	Manuelle Demontage	Wertdichte: ca. 20 €/kg – 25 €/kg
4	Entfernung grober Fremdmaterialien (manuell)	ca. < 1 bis 3 min.	Wertdichte: ca. 20 €/kg – 25 €/kg
5	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer Prozess)	Etablierte Verfahren	Zentrale Verwerter

2.4.4.3 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Die Recycling-Kette beginnt mit der Rücknahme der Altfahrzeuge. Diese können bei behördlich anerkannten Annahmestellen, Herstellern und Demontagebetrieben zurückgegeben werden. Insgesamt gibt es mehrere tausend Annahmestellen. Der Prozess der Rücknahme ist bereits etabliert. Alle Altfahrzeuge, die bei den behördlich anerkannten Annahmestellen und Herstellern sind, werden im weiteren Verlauf zu Demontagebetrieben transportiert. Hier soll die Demontage der Fahrzeugelektronik stattfinden. Demontierte Elektronik wird zu einem Aufbereiter für Elektroaltgeräte transportiert und dort bestehenden Verwertungsketten zugeführt.

Ein Mengengerüst zum Prozess für leiterplattenhaltige Fahrzeugelektronik ergibt folgendes Bild:

Tabelle 42: Mengengerüst Fahrzeugelektronik (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ag, Au, Pd, Pt)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge (500.000 Altfahrzeuge pro Jahr) 500t Leiterplatten/Jahr Tendenz zukünftige Mengen: steigend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Leiterplatte: 9,54 € (Neuwarenwert) Gesamt: 4,77 Mio. € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)

Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(1.250 Demontagebetriebe) 400 kg Leiterplatten/Jahr enthalten in Elektronikkomponenten 8,3 kg Leiterplatten/Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	3800 € Umsatz/Jahr 80 € Umsatz/Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	Annahme Grenzkostenbetrachtung: der gesamte Neuwarenwert wird dem Altfahrzeug-Demontagebetrieb vergütet 2,8 Stunden pro Woche 0,34 Stunden/Altfahrzeug um gesamte Elektronik auszubauen!
Mengen- und Wertpotential	Menge pro Altfahrzeug ca. 1 kg Leiterplatte (abgeleitet aus Groke et al. 2017 S. 86) Wert pro Altfahrzeug ca. 9,54 € Zusätzliche Erlösmöglichkeiten durch bei der Demontage anfallende sortenreine und daher höher vergütete Aluminiumfraktionen.

Das Mengengerüst und die Umsatzerlöse machen deutlich, dass die Lohnstückkosten bzw. die Zeit pro ausgebaute Elektronikkomponente hier wesentliches Kriterium sind.

Das Mengengerüst für Lambdasonden aus Altfahrzeugen stellt sich wie folgt dar.

Tabelle 43: Mengengerüst Lambdasonden (Annahme: 48 Bearbeitungswochen); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Pt, Pd)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge: 500.000 Altfahrzeuge/Jahr davon 68% relevante Benziner, d.h. 340.000 relevante Altfahrzeuge Pro Altfahrzeug 1 Lambdasonde (angenommenes Gewicht 70g) ~24.000 kg Lambdasonden/Jahr Tendenz zukünftige Mengen: geringfügig steigend
Wertpotenzial / Jahr	Gesamt: 600.000 € / Jahr (Neuwarenwert) Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	(1.250 Demontagebetriebe) Ca. 480 € Umsatz / Jahr Ca. 10 € Umsatz /Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	0,36 Std. / Woche Annahme Grenzkostenbetrachtung: der gesamte Neuwarenwert wird dem

	Altfahrzeug-Demontagebetrieb vergütet
	Bei 6 Benzinern pro Woche entspricht dies ca. 4 Minuten Ausbauezeit. In dieser Zeit müssen Altfahrzeuge identifiziert und Ausbauergebnisse gesammelt werden.
Mengen- und Wertpotential	Menge pro Lambdasonde ca. 0,044 g (Groke et al. 2017 S.162) Wert pro Lambdasonde ca. 1,8 €

Die Ausbauezeit scheint aufgrund der klaren Position der Zielobjekte realisierbar, wenn auch nicht einfach zu erreichen. Zeitliche Treiber sind „Rüstkosten“, also die Vorbereitung auf die Aufgabe „Ausbau Lambdasonde“, sofern dies nicht in den Prozess eingearbeitet werden kann. 20 kg Aufkommen pro Jahr sind zu wenig, um eine eigene logistische Lösung aufzubauen. Allerdings repräsentieren diese 20 kg, optimistisch gerechnet, einen Warenwert von ca. 480 €.

Im Bereich der Logistik fallen einmal im Quartal 20 kg Lambdasonden an. Dies entspricht der Größenordnung eines Standardpaketes, das mit einem KEP Dienst für ca. 12 € verschickt werden kann. Zu berücksichtigen ist hier die Einhaltung entsprechender Vorschriften zur gesonderten Behandlung von Abfällen im logistischen Prozess (vgl. DSLV 2015; insb. S. 14). Entsprechende Voraussetzungen wären seitens des KEP-Dienstleisters ggfs. zu schaffen. Die Menge ist so gering, dass – soweit die Voraussetzungen gegeben sind – bestehende logistische Netzwerke³⁵ für die Logistik genutzt werden können. Annahme ist, dass Transporteure noch ausreichend Laderaum verfügbar haben. Durch die Nutzung bestehender Netzwerke fallen in der Regel geringere Kosten an im Vergleich zum Aufbau neuer Netzwerke. Dennoch ist bei dem gegebenen geringen Mengenaufkommen davon auszugehen, dass der Standardpreis von ca. 12 €/Paket zu entrichten ist. Wirtschaftlich ist dies nur dann sinnvoll, wenn ca. 12 € pro Lieferung akzeptabel sind. Zudem ist die Nutzung von KEP-Dienstleistern lediglich dann interessant, wenn es Adressaten gibt, die das Material in ein bestehendes Recyclingverfahren integrieren können.

Wege zur Bündelung innerhalb bereits heute von Demontagebetrieben und ihren (potenziellen) Abnehmern genutzter Abhol- und Logistikbeziehungen können im Rahmen von Bündelungsworkshops entwickelt werden. Hilfreich zur Auslastungsplanung wäre zudem die Entwicklung eines RWWS. (s. Abschnitt 2.4.4.8)

2.4.4.4 Bündelungsebene und Motivationslage

In welcher Form soll gebündelt werden (Bündelungsebene)

Eine manuelle Separation von Leiterplatten aus Elektronikkomponenten ist aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht zu empfehlen. Der Betrieb einer Anlage zur Gehäuseöffnung z.B. mittels Prallmühle mit anschließender Sortierung kommt für Altfahrzeug-Demontagebetriebe aufgrund der geringen Menge nicht in Frage.

Die Bündelung sollte daher in Form ausgebauteer Elektronikkomponenten bzw. Lambdasonden erfolgen. Bei der Abholung sollten Lambdasonden möglichst zugleich mit erfasst, allerdings separat gehalten werden.

Die Marktakteure und ihre Motivationslage

Die zentralen Herausforderungen liegen in folgenden Feldern.

³⁵ Die KEP-Dienstleistungsnetzwerke z.B. von DHL oder Hermes bestehen aus einer engmaschigen Abdeckung ganz Deutschlands mit Abhol- und Lieferbeziehungen sowie zugehörigen Umschlagpunkten und Depots.

- Nur für einen geringen Teil der Elektronikkomponenten ist der Ausbau für Altfahrzeug-Demontagebetriebe profitabel.
- Die wirtschaftlich auszubauende und zu verarbeitende Gesamtmenge ist daher recht gering.
- Die beim einzelnen Altfahrzeug-Demontagebetrieb anfallende und zur Weiterverarbeitung abzuholende Gesamtmenge ist so gering, dass nur wenige Abholvorgänge mit geringen Einzelmengen im Jahr erforderlich sind.

Altfahrzeug-Demontagebetriebe: Die geringe separationswürdige Gesamtmenge macht es fraglich, ob der Aufwand für Aufbau und Abstimmung der Prozesse zur Demontage und Weitergabe von Elektronikkomponenten an Elektroaltgeräteverwerter aus Sicht des Altfahrzeug-Demontagebetriebs zu rechtfertigen ist. Die Situation stellt sich günstiger dar für Ausbau und Weitergabe leicht zugänglicher und relativ hochwertiger Komponenten wie etwa Lambdasonden, soweit hierfür Abnehmer und Logistikprozesse vorhanden sind. Wenn der Aufwand für Aufbau und Betrieb des Demontage- und Weitergabeprozesses aus den Erlösen nicht refinanzierbar ist, ist er unattraktiv. Die ökonomische Attraktivität kann jedoch in gewissem Umfang durch eine effiziente Logistik gesteigert werden.

Elektroaltgeräteaufbereiter: Auch hier stellt die geringe zu erwartende Gesamtmenge an Elektronikkomponenten die wesentliche Hürde dar. Es ist fraglich, ob der Aufbau einer Anlage zum Aufbrechen der Gehäuse per Prallmühle bzw. die Ertüchtigung vorhandener Anlagen für das Aufbrechen von Aluminiumgehäusen betriebswirtschaftlich zu rechtfertigen ist. Dies dürfte nur dann erfolgen, wenn die verlässliche Belieferung mit hinreichend großen Mengen an Elektronikkomponenten gesichert ist. Der Aufbau eines Abholservice für die Komponenten beim Altfahrzeugverwerter durch Elektroaltgeräteaufbereiter ist angesichts der geringen Mengenströme keine realistische Annahme.

Ein wichtiger Faktor ist zudem die Preisfindung zwischen Altfahrzeug-Demontagebetrieben und Elektroaltgeräteaufbereitern. Die Preisbildung wird sich auf eine Liefermenge ausgebauter Fahrzeugelektronik beziehen müssen. Wie diese Menge zusammengesetzt ist und welche Materialwerte darin enthalten sind ist, nicht bekannt. Ausreichende Mengen für repräsentative Beprobungen zur Bestimmung der Edelmetallgehalte etwa in Kupferhütten, aber auch des Gehalts z.B. an Aluminium werden voraussichtlich nicht zur Verfügung stehen. Die Preisbildung des Elektroaltgeräteaufbereiters wird daher entsprechende Sicherheitsaufschläge enthalten müssen.

2.4.4.5 Informationsbedarf

Der Informationsbedarf der Akteure von anderen Akteuren hängt von dem Abfallstrom sowie von Art und Rahmenbedingungen der Umsetzung ab und muss im konkreten Falle unter Einbindung der Beteiligten bestimmt werden. Im Herbst 2017 wurde im Rahmen des Projekts der Workshop „Informationsbedarf und -bereitstellung“ durchgeführt. Darin wurde mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern für die Abfallströme NdFeB-Magneten (siehe Abschnitt 2.4.3.6) und edel- und sondermetallhaltige Fahrzeugteile (siehe unten) herausgearbeitet, welche Informationen die „Altfahrzeugdemontagebetriebe“, die „Logistiker“ und die „Verwerter“ für eine effiziente Behandlungs- und Verwertungskette benötigen. Die Bewertungen, die im Rahmen der Unter-Arbeitsgruppe zu Fahrzeugelektronik mit 12 Teilnehmerinnen und Teilnehmern gesammelt wurden, sind in Tabelle 44 (Informationsbedarf der Demontagebetriebe), Tabelle 45 (Logistiker) und Tabelle 46 (Verwerter = Elektroaltgerätebehandler) zusammengefasst. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben jede Information mit „unverzichtbar“, „nice to have“ oder „unnötig“ bewertet. Außerdem wurden sie gebeten, zu jedem Informationsblock anzugeben, ob sie sich gut in der Praxis auskennen. Die Tabelle zeigt in der Spalte „erforderlich?“ jeweils die deutliche Mehrheitsmeinung. Unter Gegenstimmen ist die Anzahl der gegensätzlichen Einschätzungen durch Sachkenner angegeben.

Tabelle 44: Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Altfahrzeugdemontagebetriebe gegenüber anderen Akteuren haben

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu Fahrzeugelektronik mit 12 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner

Informationen zur Demontage	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Welche Bauteile enthalten Leiterplatten?	Ja	--
Art und Lage der Bauteile modellspezifisch	Ja	--
Art und Lage der Bauteile fahrzeugspezifisch	Ja	1
Demontageanweisungen	Ja	1
Zugänglichkeit der Bauteile	Ja	1
Informationen zur Bewertung		
Ausbauwürdigkeit (Aufwand/Erlös)	Ja	1
Zeitaufwand Demontage je Bauteil (ggfs. qualitativ)	Ja	1
Zu erwartender Erlös je Bauteil	Ja	--
Masse der Leiterplatten (für jedes Bauteil)	Nein	1
Anteil Masse Leiterplatten am Bauteil (für jedes Bauteil)	Nein	1
Klasse / eindeutige Bezeichnung	Nein	1
Informationen zur Weitergabe		
Abholbedingungen des Logistikers	Ja	--
Annahmebedingungen des Verwerterers	Ja	--
Strategische Informationen		
Künftige Anliefermärkte: zu erwartende Anzahl Bauteile / Fahrzeugtypen	Ja	1
Künftige Absatzmärkte: zu erwartende Qualitätsanforderungen und Erlöse	Ja	1

Tabelle 45: Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Logistiker gegenüber anderen Akteuren haben

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu Fahrzeugelektronik mit 12 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner

Informationen zur Abholung	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Abfallbezeichnung	Ja	--
Kundendaten Demontagebetrieb	Ja	--
Abholadresse / Abholort / Ansprechpartner vor Ort wenn nötig	Ja	--
Abholtag und Zeitfenster	Ja	--

Masse oder Volumen der Abfallfraktion	Ja	--
Tauschbehälter oder Entleerung z.B. in Sammelbehälter	Ja	--
Behälter ID / Identifikationssystem	Nice to have	--
Behälter Typ (Art, Maße) oder Transporthilfsmittel (z.B. Europalette)	Ja	--
Besondere Anforderungen an den Transport (Feuchtigkeit, Vermischungsverbote, ...)	Ja	--
Informationen zur Anlieferung		
Lieferung an (Firma, Ort, Anlieferstelle)	Ja	--
Strategische Informationen		
Abholung: Welche Mengen fallen wo an? Gibt es weitere Potenziale?	Nice to have	--
Ziele: wohin müssen die anfallenden Mengen geliefert werden?	Nice to have	1

Tabelle 46: Informationsbedarf zu Fahrzeugelektronik. Workshop-Ergebnisse zur Bewertung des Informationsbedarfs, den Verwerter (Elektroaltgeräteaufbereiter) gegenüber anderen Akteuren haben

Workshop im Rahmen des vorliegenden Projekts ILESA am 15.09.2017. Unter-Arbeitsgruppe zu Fahrzeugelektronik mit 12 Teilnehmern; Zahl Gegenstimmen nur Praxiskenner

Informationen zum Wareneingang	Erforderlich?	Zahl Gegenstimmen (nur Praxiskenner)
Abfallbezeichnung	Ja	--
Masse Anliefercharge	Ja	--
Anteil Leiterplatten an Masse Liefercharge	Nein	--
Edelmetallgehalt der Leiterplatten	Nein	--
Informationen zur Weitergabe		
Kundendaten des Anlieferers	Ja	--
Annahmebedingungen Folgeverwerter (Qualitätsforderungen und Erlöse)	Ja	--
Strategische Informationen		
Strategisch Anliefermärkte: zu erwartende Mengen, Qualitäten und Preise?	Eher ja	1
Strategisch Absatzmärkte: zu erwartende Bedarfe, Qualitätsanforderungen und Erlöse?	Eher ja	1

In der Diskussion wurden unter anderen folgende Auffassungen vertreten:

- Logistik
 - Überwiegend wurde die Auffassung vertreten, dass strategische Informationen in der Praxis nicht erforderlich seien. Logistiker seien reine Dienstleister. Zudem gelte: je wertvoller

die Ware, desto größer das Risiko, dass die Ware „unterwegs verloren geht“. Schließlich bestimme der Kunde Abhol- und Anlieferort. Der Logistiker sei nicht Besitzer der Güter.

- Andere Teilnehmer wiesen darauf hin, dass aus strategischer Sicht Informationen darüber, wo Mengen wann anfallen, wichtig seien, um Kapazitäten planen zu können. Diese Möglichkeit beeinflusse auch den Logistik-Preis.
- Es müsse unterschieden werden zwischen einem klassischen Logistiker, der überschaubare Mengen an Leiterplatten im Rahmen eines normalen Auftrags fährt einerseits und andererseits einem Produktrücknahmesystem mit Steuerungsfunktion bzw. dem Fall, dass sich Logistiker und Verwerter im gleichen Unternehmen befänden.
- Wichtig sei eine einfache Abfrage der Informationen. Insbesondere eine sehr genaue Abholadresse (mit Anfahrtstor und -rampe) zu erhalten sei oft nicht einfach.
- Demontage
 - Diskutiert wurde vor allen Dingen die Frage, wer die Informationen liefern soll.
 - Aus Herstellersicht seien Hinweise wichtig, aber die Automobilindustrie sei nicht in der Pflicht, Detailinformationen zur Handhabungen für die Demontage zur Verfügung zu stellen. Die Betriebe müssen Expertise besitzen, ergänzt durch „Learning by doing“.
 - Aus Sicht der Demontagebetriebe gebe es in der Praxis Nachholbedarf. Auch sei Expertise nicht selbstverständlich. Die Fahrzeuge würden immer komplexer und die Ausbildung in der Autoverwerterbranche lasse oft zu wünschen übrig. Die Hersteller stellen für andere Bauteile bereits Informationen zur Verfügung (z.B. in IDIS), es sei nicht einsehbar, warum nicht auch zu Fahrzeugelektronik? Demontagebetriebe nehmen Informationen aus jeglichen Quellen gerne an. Ein Teil der Informationen wird aus Fachzeitschriften oder Lehrgängen bezogen.
- Verwerter
 - Da die Preise der Edelmetalle stark schwanken seien Wertangaben keine feststehende Information. Zudem seien Informationen zu Edelmetallgehalten Betriebsgeheimnisse.
 - Die Gehäuse der Elektronikkomponenten spielen bzgl. des Wertes ebenfalls eine wichtige, wenn nicht entscheidende Rolle.
 - Strategische Informationen betreffen Geschäftsgeheimnisse und den Wettbewerb. Dies sei eine firmenintern wichtige Unternehmenskompetenz.
- Allgemein
 - Es sei eine bessere Kommunikation zwischen den Akteuren erforderlich. Gemeinsame Ziele zu entwickeln sei in der Praxis allerdings kaum zu realisieren.

2.4.4.6 Szenario für ein mögliches marktgetriebenes Bündelungskonzept

Ein marktgetriebener Ansatz für ein Bündelungskonzept mit erheblicher Mengenwirkung erscheint für die hier betrachteten Abfallströme nicht realistisch. Ein Szenario mit beschränktem Mengeneffekt könnte folgendermaßen aussehen:

Ein oder mehrere Elektronikschrott-Erstbehandler bauen einen neuen Prozess auf (Prallmühle, Sortierung) oder passen einen vorhandenen, für andere Einsatzzwecke vorgesehenen Prozess an, um Fahrzeugelektronik im Kampagnenbetrieb aufbereiten zu können. Sie bieten für Fahrzeugelektronik eine Vergütung nach Tagesfestpreisen an, die an Mindest-Qualitätsanforderungen geknüpft ist.

Interessierte Altfahrzeug-Demontagebetriebe separieren leicht ausbaubare edelmetallhaltige Komponenten und bündeln sie mit Komponenten, die für den Gebrauchtteileverkauf separiert wurden, sich aber als schadhaft erwiesen haben.

Unternehmen, die bereits im Umfeld der Altfahrzeug-Demontagebetriebe Entsorgungslogistik betreiben oder beauftragen, bieten in Kooperation mit Elektronikschrott-Erstbehandlern die Abholung der Fahrzeugelektronik an. Denkbar wären hier beispielsweise.

- Werkstattentsorger, die auch defekte Steuergeräte aus Kfz-Werkstätten zubündeln könnten um etwas größere Mengen zu erzielen
- Unternehmen, die andere edelmetallhaltige Abfälle (z.B. Katalysatoren) bei Altfahrzeug-Demontagebetrieben abholen und verwerten

Chancen für die Beteiligten

- Altfahrzeug-Demontagebetriebe: geringfügige Zusatzerlöse
- Elektronikschrott-Erstbehandler: geringfügige Zusatzerlöse und Zugang zu einem möglicherweise künftig etwas interessanteren Markt; je nach Preisbildung Erlösvorteile z.B. Aluminiumerlöse höher als Vergütung an Altfahrzeug-Demontagebetriebe
- Logistiker: geringfügige Zusatzerlöse; bei Zubündelung zu weiteren Verwertungsmengen evtl. etwas höhere Erlöse durch Mengenbündelung

Risiken für die Beteiligten

- Altfahrzeug-Demontagebetriebe: durch geringes Mengen- und Wertpotenzial ist die Wirtschaftlichkeit des Managements der zusätzlichen Materialfraktion fraglich (Mitarbeiteranleitung, Behälterstellplatz, Abwicklung der Abholung); schwierige Preisbildung und schwankende Rohstoffpreise
- Elektronikschrott-Erstbehandler: durch geringes Mengen- und Wertpotenzial ist schon die Wirtschaftlichkeit des Prozessmanagement für Annahme, Vergütung und ggfs. Qualitätsreklamation fraglich; Aufbau einer Prallmühlenlinie allenfalls bei Umnutzung vorhandener Technik refinanzierbar; Umfang und Konstanz der Beteiligung von Altfahrzeug-Demontagebetrieben fraglich; schwierige Preisbildung und schwankende Rohstoffpreise
- Logistiker/Abholer: geringe Abholfrequenzen und Einzel- sowie Gesamtmengen; Finanzierbarkeit der vergleichsweise hohen Einzelkosten über die Erlöse fraglich

Fazit: Das wirtschaftliche Potenzial für die Beteiligten ist nach Höhe und Verlässlichkeit recht gering. Das Zustandekommen umfassenderer marktgetriebener Aktivitäten erscheint unwahrscheinlich.

2.4.4.7 Regulatorische Maßnahmenoptionen

Sollte ein regulatorisch getriebener Ansatz realisiert werden, so sind folgende, überwiegend zunächst im europäischen Recht zu verankernde Regelungen denkbar und werden im Folgenden auf Zweckmäßigkeit untersucht. In Kapitel 5.3 erfolgt eine Zusammenfassung und vergleichende Bewertung der möglichen zweckmäßigen Maßnahmen.

- Designvorgaben an die Fahrzeugindustrie
 - Ziel: demontagerechte Konstruktion mit Blick auf größere Elektronikkomponenten
 - Verpflichtung zum demontagerechten Einbau (s. z.B. VDI Richtlinie 2243: recyclingorientierte Produktentwicklung) größerer Elektronikkomponenten in Fahrzeuge; Eingrenzung auf relevante Komponenten, um unangemessenen Aufwand zu vermeiden;

als erste Grundlage einer Auswahl-Orientierung könnte die Separationsempfehlung von Groke et al. (Groke et al. 2017) dienen

- Zuvor sollte geprüft werden, in welchem Umfang Konflikt mit den Designzielen Gewichtsreduzierung und Materialeffizienz auftreten können.
- Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie und in der AltfahrzeugV, ggfs. in Form zusätzlicher bzw. ergänzter Anhänge
- Nur zielführend in Kombination mit einer Ausbaupflichtung für Altfahrzeug-Demontagebetriebe
- Verpflichtung zum Ausbau größerer Fahrzeugelektronik-Komponenten und zur Zufuhr zu einem Verwertungsprozess, bei dem Leiterplatten abgetrennt und der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden
 - Ziel: Ausbau und hochwertige Verwertung der relevanten Komponenten
 - Eingrenzung auf relevante Komponenten (s.o.)
 - Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie, Anhang I (Technische Mindestanforderungen für die Behandlung) Nr. 4 (Behandlung zur Verbesserung des Recycling) bzw. in der AltfahrzeugV, Anhang (Anforderungen an die Annahme und Rücknahme von Altfahrzeugen, an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Altfahrzeugen und Restkarossen sowie an die ordnungsgemäße und schadlose Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle), Punkt 3.2.3.3
 - Soweit neue Anforderungen an die Ausschleusung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen von Altfahrzeugen im Rahmen der Demontage gesetzlich festgelegt werden sollten, würde dies auch bedeuten, dass die Hersteller den Demontagebetrieben entsprechend ergänzte Demontagehinweise zur Verfügung stellen müssen, aus denen sich ergibt, wie diese edel- und sondermetallhaltigen Bauteile ausgebaut werden können.

2.4.4.8 Nicht regulatorische Maßnahmenoptionen für eine effizientere Logistik

Über die Möglichkeiten rechtlicher Regelungen hinaus werden folgende Maßnahmenoptionen gesehen:

- **Altfahrzeugrücklauf verbessern:** Dies steigert das Potenzial zur Rückgewinnung von Edelmetallen sowohl im Falle der Demontage edelmetallhaltiger Teile als auch – mit deutliche schlechteren Ausbeuten - beim Schreddern noch in den Fahrzeugen enthaltener, nicht demonzierter Bauteile. Möglichkeiten hierzu sind etwa eine Stärkung des Vollzugs oder die Wiedereinführung der endgültigen Stilllegung und vorübergehenden Außerbetriebsetzung mit jeweils spezifischen Anforderungen und Erfassung der Halterdaten auch während der Außerbetriebsetzung.
- **Postschredderoptimierung:** Förderung von Projekten zur Verbesserung der Edelmetallausbeute (wie auch der Ausbeute weiterer Metalle wie z.B. Stahl, Kupfer und Aluminium) aus Schredderfraktionen im Falle nicht demonzierter edelmetallhaltiger Bauteile.
- **Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“** zur Übertragung von Lean Management Ansätzen auf Demontageprozesse in der Recycling-Wirtschaft: Die Handreichung beinhaltet Aufwandreduzierung in der Demontage durch die Anwendung von bekannten Lean Management Konzepten.³⁶ Sie kann wirksam verbreitet werden durch Vorstellung in Verbän-

³⁶ Vgl. Gorecki, Pautsch (2014)

den und auf Fachveranstaltungen. Die Handreichung sollte sich nicht explizit auf edelmetallhaltige Bauteile beziehen, sondern aus übergeordneter Sicht formuliert sein und besonderes Augenmerk auf die Umsetzbarkeit für KMU legen. (vgl. Kapitel 2.2.4.2.1)

- **Integration von Informationen zu** Verbauorten von Elektronik zum Zweck eines schnelleren Ausbaues in das oben (vgl. Kapitel 2.4.2.1) beschriebene **RWWS**. Dazu sollen Schnittstellen zwischen RWWS und bestehenden Plattformen wie z.B. IDIS (das im Falle der Einführung einer gesetzlichen Verpflichtung entsprechend ergänzt werden müsste) entwickelt werden.
- **Bündelungs-Workshops:** Im Rahmen von Bündelungsworkshops werden Möglichkeiten erarbeitet, bestehende Netzwerke zu nutzen und auszubauen (s. Abschnitt 2.4.2.4): Sinnvoll könnte das Zusammenbringen von Demontagebetrieben (und ggf. weiteren Betrieben mit ähnlichen Abfällen aus anderen Branchen) mit deren potenziellen Abnehmern und Logistikern zur Entwicklung neuer Netzwerke sein. Ziel ist es, dass entsprechende Vereinbarungen getroffen werden, um heute bereits etablierte Abholbeziehungen zu nutzen und neue Verbindungen aufzubauen. In Bündelungsworkshops werden die logistischen Netze der einzelnen Akteure erarbeitet und „übereinandergelegt“. So werden parallel laufende Transportprozesse sichtbar und damit Bündelungspotenziale deutlich. Die Zusammenführung der parallelen Transporte zu einem Transportnetz kann helfen Kosten zu sparen. Motivation zur Teilnahme an einem Workshop kann es sein, diese Einsparungspotenziale in Aussicht zu stellen. Für die Organisation der Bündelungsworkshops sollte die Initiatoren Kontakt zu den betroffenen Verbänden aufnehmen. In bilateralen Gesprächen mit den Verbänden (z.B. bvse, bde, DSLV) kann ermittelt werden, wer geeigneter Ausrichter und Einladender für einen Workshop ist. Das Interesse von Unternehmen an solchen Aktivitäten ist am ehesten dann gegeben, wenn die Initiative von der eigenen Branche, bzw. einem Branchenverband ausgeht. Das Interesse der Verbände und ihrer Mitgliedsunternehmen wird aufgrund des geringen Wertpotenzials eher gering sein wenn sich solche Aktivitäten auf Fahrzeugelektronik und Lambdasonden beschränken. Die Workshops sollten daher Optimierungspotenziale bei der Bündelung von Kleinmengen generell thematisieren.

2.4.5 Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren

2.4.5.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

In Deutschland fallen jährlich ca. 800 t PGM-Katalysatoren an (Hassan 2003; S. 25), davon ca. 30 t/a in Umweltprozessen (Hassan 2003; S. 74). Die Edelmetallgehalte liegen meist zwischen 0,05 und 10 %. Bei Abgas- und Abluftreinigungsprozessen auch oft unter 0,02 %.

Die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Katalysatoren ist bereits gängige Praxis. Ausgenommen sind Katalysatoren mit sehr geringen Edelmetallkonzentrationen, da ein wirtschaftliches Recycling erst ab ca. 0,01 % (bei Pt-Katalysatoren) möglich ist. Vor allem Großunternehmen nutzen bestehende Verbindungen zu Recyclingunternehmen und entscheiden sich fast immer für ein Recycling (Hassan 2003; S. 25).

Bei der Entwicklung neuer Katalysatoren wird in der Regel das Rückgewinnungsverfahren gleich mitkonzipiert. Die Rücknahme der verbrauchten Katalysatoren ist dabei meist über langjährige Verträge zwischen dem Chemieunternehmen und dem Hersteller der Katalysatoren geregelt. Das Herstellerunternehmen ist dabei oft auch zugleich das Recyclingunternehmen. Besonders günstig für das Recycling ist darüber hinaus, dass die Anzahl der Verbraucher im Bereich der chemischen Industrie gering und die Menge pro Verbraucher relativ groß ist, wodurch der Aufwand für die Sammlung verhältnismäßig gering ist (Hassan 2003; S. 25).

Eine Ausnahme stellen Umweltkatalysatoren dar, die in geringen Einzelmengen beispielsweise in Blockheizkraftwerken oder der katalytischen Nachverbrennung eingesetzt werden. Katalysatoren aus

diesen Anwendungen werden weit überwiegend dem Stahlschrott oder dem Restmüll zugeführt. Die Edelmetallgehalte sind dadurch nahezu vollständig verloren.

Tabelle 47: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von edelmetallhaltigen Umweltkatalysatoren

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, die Katalysatoren werden weit überwiegend dem Stahlschrott oder dem Restmüll zugeführt.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Nein, s.o.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, s.o.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Nein, s.o.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Nein, s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, beim Austausch der Katalysatoren
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Nein, s.o.

2.4.5.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Edelmetallkatalysatoren werden bereits fast vollständig recycelt. Die Gesamtverluste liegen vermutlich unter 4 %. Dabei berücksichtigt sind Verluste im Prozess, Verluste durch Beseitigung von Katalysatoren mit geringen Metallgehalten und Verluste beim Recycling (Hassan 2003; S. 74).

Umweltkatalysatoren aus dezentralen Anwendungen können den vorhandenen Recyclingverfahren zugeführt werden. Eine Entwicklung technischer Prozesse ist nicht erforderlich.

Abbildung 12: Umweltkatalysatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Umweltkatalysatoren				
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare	
1	Sammlung / Erfassung Umweltkatalysatoren	Katalysatoranwender		
2	Vorbehandlung / Demontage	Katalysatoraufbereiter	Entfernung von Störstoffen, Begleit- und Stützbauteilen	
3	Entmantelung	Katalysatoraufbereiter	Wertdichte: 5 bis 50 €/kg	
4	Ausbau Monolith	Katalysatoraufbereiter	Wertdichte: 40 bis 200 €/kg	
5	Zerkleinerung / Homogenisierung	Feinstvermahlung + Enstaubungsanlage	Katalysatoraufbereiter	Wertdichte: 40 bis 200 €/kg
6	Sortierung / Bemusterung	Katalysatoraufbereiter	Wertdichte: 40 bis 200 €/kg	
7	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer Prozess)	Hüttenprozesse/ Scheideanstalten		

2.4.5.3 Bündelungskonzept

Zentrale logistische Herausforderung ist hier die Steigerung der Erfassungsrate, um mehr Masse in einen etablierten Prozess zur Rückgewinnung von Edelmetallen aus Katalysatoren zu bekommen. Dazu ist zum einen die Information der Betreiber von Anlagen, in denen Umweltkatalysatoren genutzt werden, über Edelmetallgehalte und Rückgabemöglichkeiten erforderlich. Zum anderen sollte der Rücknahmeprozess für die Anlagenbetreiber so niedrigschwellig und einfach wie möglich gestaltet werden.

Dies könnte realisiert werden durch Anbringung eines QR Codes auf den Katalysatoren und den zugehörigen Papieren. Der QR Code ist auf dem Katalysator bzw. gut sichtbar in der Nähe des Katalysators so anzubringen, dass er die Nutzungsphase überdauert. Ziel ist, dass beim Ausbau des Katalysators der QR Code abgescannt wird. Dies ist in direkter Umgebung zu vermerken.

Der QR Code verlinkt dann auf eine Website. Dort kann die Adresse zur Abholung des Katalysators angegeben werden. Die Website kann so unabhängig vom Einbaudatum des Katalysators immer wieder aktualisiert werden. Die Anmeldung auf der Website kann unterschiedliche Verfahren anstoßen, die sich auch auf unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten anpassen lassen.

Denkbar wäre es, interessierten Aufbereitern oder Maklern die Katalysatoren im Windhundprinzip zugänglich zu machen: Wer den gemeldeten Katalysator abholen möchte, muss als erster die Abholung zusagen. Wird nicht in bestimmter Zeit eine Abholung zugesagt, dann wird ein räumlich nahegelegener Aufbereiter zugeordnet und die Abholung auf dessen Kosten angestoßen. Die Akzeptanz dieses Vorgehens stellt die Eintrittskarte zum System dar. Die Plattform könnte über einen Betreiber aufgebaut und gepflegt werden, der gemeinschaftlich von Herstellern oder Aufbereitern beauftragt wird. Die Finanzierung könnte über eine Abgabe pro abgeholten Katalysator erfolgen.

Es ist jedoch fraglich, ob der Wert einzelner Katalysatoren ausreicht, um zum Aufbau solcher oder anderer Systeme und zur Teilnahme zu motivieren.

Informationsbedarf

Informationsbedarf wird über die zur Organisation der Logistik erforderlichen Daten hinaus nur in einem Bereich gesehen: Katalysatoranwender benötigen Informationen darüber, dass die Katalysatoren Edelmetalle enthalten und über Rückgabemöglichkeiten.

2.4.5.4 Maßnahmenoptionen

Ein Round-Table-Gespräch mit Katalysatorherstellern und Vertretern von Katalysatoranwendern könnte helfen, Möglichkeiten einer besseren Information der Anwender und eines Ausbaus der Rücknahmemöglichkeiten zu entwickeln. In dieses Gespräch kann der oben skizzierte QR-Code-Ansatz als eine Handlungsmöglichkeit eingebracht werden.

Da Umweltkatalysatoren nach dem Austausch ohnehin separiert vorliegen und damit grundsätzlich gut zugänglich und verwertbar sind, sollte geprüft werden, ob die Einführung einer gesetzlichen Pflicht zur getrennten Sammlung zweckmäßig ist, z. B. durch Einführung einer Produktverantwortung für Hersteller und Importeure oder, soweit die Umweltkatalysatoren als gewerbliche Abfälle anfallen: Erweiterung der Gewerbeabfallverordnung mit Pflichten für die Endnutzer, bei denen die Umweltkatalysatoren als Abfall anfallen. Soweit es sich bei den Umweltkatalysatoren um gefährliche Abfälle nach der AVV handelt, sind diese bereits nach gegenwärtiger Rechtslage getrennt von anderen Abfällen zu halten. Eine Vermischung von getrennt angefallenen, gefährlichen Abfällen mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen (=gefährliche Abfälle mit einem anderen AVV-Abfallschlüssel) oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien ist nach § 9 Abs. 2 KrWG nämlich grundsätzlich unzulässig.

2.4.6 Cer- und lanthanhaltige Abfallströme

2.4.6.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Tabelle 48 zeigt die Mengen- und Wertpotenziale an Cer und Lanthan aus unterschiedlichen Einsatzbereichen.

Tabelle 48: Mengen- und Wertpotenziale an Cer und Lanthan aus unterschiedlichen Einsatzbereichen für das Jahr 2020

Anwendungsbereich	Menge		Menge und Wert				Trend
	Ce ¹⁾	La ¹⁾	Cer und Lanthan gesamt ^[2]		Deutschland u. angrenzende Staaten (in Klammern: EU gesamt)		
	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	
	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[T €]	[t/a]	[T €]	
Poliermittel	90	3	93	419	237 (465)	1048 (2095)	gleich bleibend
Separierte FCC-Katalysatoren	80	170	250	1125	638 (1250)	2869 (5625)	gleich bleibend
Separierte Autokatalysatoren	120	8	128	576	326 (640)	1469 (2880)	gleich bleibend
(NiMH)-Batterien	120	52	172	774	439 (860)	1974 (3870)	gleich bleibend
Spezialgläser / Keramiken	?	?	?	?	?	?	gleich bleibend
Summe	> 410	> 233	> 643	2894	>1640 (>3215)	>7380 (>14470)	

[1] Mengendaten von Sander et al. (Sander et al. 2017; S. 35)

[2] Neuwarenwerte Ce 4,5 €/kg; La: 4,5 €/kg (Quelle: USGS 2017)

Die Angaben zum Gehalt an Cer und Lanthan sind als Näherung zu verstehen, da die Zusammensetzung innerhalb der Anwendungsgruppen erheblich streuen kann. Belastbare Zahlen sind nicht für alle Abfallströme verfügbar.

Einsatz und Verbleib von Cer und Lanthan in Poliermitteln

Typische Anteile der Zielmetalle im Poliermittel nach Gebrauch liegen bei ca. 22,1 Gew.-% Cer und ca. 17,8 Gew.-% Lanthan (Sander et al. 2017; S. 363). Bei einem Gesamtpotential von 90 t Cer (Sander et al. 2017; S. 310). ergibt sich damit eine Gesamtmenge an Poliermittel-Trockenmasse für das Jahr 2020 von etwa 400 t/a. Die Abfallmenge ist aufgrund des Wassergehaltes und des Glasabriebs größer.

In Wasser aufgeschlämmt wird CeO₂ zum Schleifen von Glasoberflächen verwendet. Typische Korngrößen liegen zwischen 0,5 und 1,5 µm. Der Gehalt an CeO₂ nach dem Polieren beträgt zwischen 5 und 80 % (Adler, Müller 2014; S. 132). Weitere Bestandteile sind Abrieb und Wasser. Alternativ werden bei Lieferengpässen oder aus Kostengründen auch ZrO₂ oder Al₂O₃ verwendet.

Poliermittel werden üblicherweise in den Unternehmen im Kreislauf geführt. Wenn die Polierwirkung nachlässt, werden sie entwässert und in der Regel deponiert.

Tabelle 49: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Poliermitteln zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Ja
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Meist erfolgt die Erfassung in den Unternehmen separat, teils aber gemischt mit Schleifschlämmen. Bei der Erfassung durch Entsorger kommt es üblicherweise zur Vermischung mit anderen Abfällen.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, denn derzeit findet in der Regel keine Verwertung statt.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, die Abfälle könnten nach der Abholung relativ problemlos separat gehalten und der Verwertung zugeführt werden.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Nein, s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Die Abfälle liegen ab Werk Hersteller separiert vor, die Getrennthaltung durch Entsorger oder auch eine Zuführung zu Verwertungspfaden ab Werk wäre bei Bestehen einer Verwertungslösung problemlos realisierbar. Ggfs. müsste die Erfassung in den Unternehmen angepasst werden.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Nein

Einsatz und Verbleib von Cer und Lanthan in Spezialgläsern und Keramiken

Cer wird zur Entfärbung von Gläsern verwendet. Lanthan wird darüber hinaus noch zur Erzeugung von Gläsern mit hohem Brechungsindex und hoher Klarheit eingesetzt. Zur Entfärbung werden der Glasschmelze Ce^{4+} - Ionen zugefügt. Diese oxidieren die Fe^{2+} -Ionen, die für die Färbung des Glases verantwortlich sind, zu Fe^{3+} -Ionen, die deutlich geringere Farbeffekte verursachen. Die dabei im Glas verbleibenden Ce^{3+} -Ionen absorbieren nur im UV-Bereich und nicht im sichtbaren Bereich. Die Absorption von UV-Strahlung kann zudem in UV-Schutzbrillen oder gläsernen Verpackungsmaterialien genutzt werden (Adler, Müller 2014; S. 92-93).

Haupteinsatzbereich sind vor allem Strahlenschutzgläser und Lasergläser. Die Cer-Konzentrationen liegen hier bei ca. 1-2% (Sander et al. 2017; S. 176ff). Eine Separation und Verwertung der Gläser findet derzeit nicht statt.

Zur jährlich in Deutschland anfallenden Menge an Spezialgläsern und Keramiken liegen keine belastbaren Zahlen vor.

Seltenerdmetalle werden außerdem in Schleifkeramiken/-medien und keramischen Hitzeschutzbeschichtungen in Gasturbinen eingesetzt. Nur ein Teil der Schleifkeramiken enthält allerdings Cer. Für

den deutschen Markt hat Cer in diesem Einsatzbereich keine besondere Relevanz. Gleiches gilt für Hitzeschutzbeschichtungen (Sander et al. 2017; S. 257ff).

Dieser Abfallstrom wird daher nicht weiter verfolgt.

Einsatz und Verbleib von Cer und Lanthan in separierten FCC-Katalysatoren

Seltenerdmetalle werden als Promotoren in FCC-Katalysatoren (FCC: Fluid Catalytic Cracking) in der petrochemischen Industrie verwendet. Der weitaus größte Anteil entfällt auf Lanthan, das zur Dotierung von Zeolithen verwendet wird. Zeolithe für das katalytische Cracken können dabei 2-3,5 % Seltenerdmetalloxide enthalten (Sander K. et al. 2017; S. 132). Seltenerdmetalle werden darüber hinaus zur α - Form des Aluminiumoxids zugegeben, um die Oberflächenaktivität über 1000 °C zu erhöhen. Der jährliche Gesamtverbrauch an Zeolithen für das katalytische Cracken wird auf 9.400 t geschätzt (Hassan 2003; S. 11). In Deutschland wird der größte Teil der Zeolithe derzeit in Zementwerke eingebracht.

Tabelle 50: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von FCC-Katalysatoren zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Ja, die Mengen werde nahezu vollständig erfasst.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Ja, die Mengen werden zunächst unvermischt erfasst.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, denn derzeit findet keine Verwertung statt.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, die Abfälle könnten nach der Abholung relativ problemlos separat gehalten und der Verwertung zugeführt werden.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Nein, s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Die Abfälle liegen ab Werk Raffinerie separiert vor. Die Getrennthaltung durch Entsorger oder auch eine Zuführung zu Verwertungspfaden ab Werk wäre bei Bestehen einer Verwertungslösung problemlos realisierbar.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Nein

Einsatz und Verbleib von Cer und Lanthan in separierten Autokatalysatoren

Cer- und Lanthan-Oxide dienen der thermischen Stabilität des Trägerkörpers in Autokatalysatoren. Darüber hinaus dient Cer in Form eines CeO_2/Ce_2O_3 -Gemisches als Sauerstoffregulator. Autokatalysatoren werden bei der Altfahrzeugbehandlung bereits ausgebaut und aufbereitet. Die Aufbereitung konzentriert sich jedoch auf die Edelmetalle. Bei dem dabei verwendeten Hüttenprozess finden sich die Seltenerdmetalle in der Schlacke. Die Schlacke wird als Baumaterial verwendet. In Deutschland fallen jährlich ca. 3.000 t Schlacken aus dem Recycling von Autoabgaskatalysatoren an. Diese enthalten < 2,5 % Cer und < 0,5 % Lanthan (CUTEC 2016).

Tabelle 51: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung der Schlacken aus der Aufbereitung von Autokatalysatoren zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Ein erheblicher Teil der endgültig außer Betrieb gesetzten Fahrzeuge wird nicht in Deutschland entsorgt. Dies wirkt sich direkt auf das Mengenpotenzial aus.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Ja, Autokatalysatoren werden separiert und der Edelmetallrückgewinnung zugeführt.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Nein, derzeit ist dieser Verwertungspfad nicht in nennenswertem Umfang realisiert, daher existiert keine Bündelungslogistik für die betrachteten Abfallströme.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, die Schlacken aus der Edelmetallrückgewinnung enthalten die Seltenerdmetallanteile der Katalysatoren und könnten einer weiteren Verwertung zugeführt werden.
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Ja
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja

Einsatz und Verbleib von Cer und Lanthan in NiMH-Batterien

Cer und Lanthan werden in Batterien zur Erhöhung der Wasserstoff-Speicherkapazität verwendet. Typische Gehalte liegen dabei zwischen 7 und 10 %. Die Rücknahme von Batterien ist in Deutschland über das Batteriegesetz (BattG) geregelt. Über die Batterierücknahmesysteme wurden 2012 ca. 530 t (Sander K. et al. 2017; S. 358) Ni(MH)-Batterien eingesammelt. Nach dem Sortieren nach elektrochemischem System werden die Batterien vorzerlegt und anschließend mechanisch aufbereitet. Dabei werden Kunststoffe entfernt. Das Metallgemisch wird anschließend in der Regel im Stahlwerk eingesetzt. Die enthaltenen Seltenerdmetalle gehen dabei verloren.

Tabelle 52: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von NiMH-Batterien zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der Batterien wird nicht ordnungsgemäß entsorgt.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Ja
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja, die NiMH-Batterien werden nach der Sammlung in der Regel im Rahmen der Batteriesortierung gebündelt.

Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Ja, bis auf die geringe Erfassungsquote
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren, die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja, bis auf den letzten Aufbereitungsschritt, die Verarbeitung in Stahlwerken

2.4.6.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Poliermittel

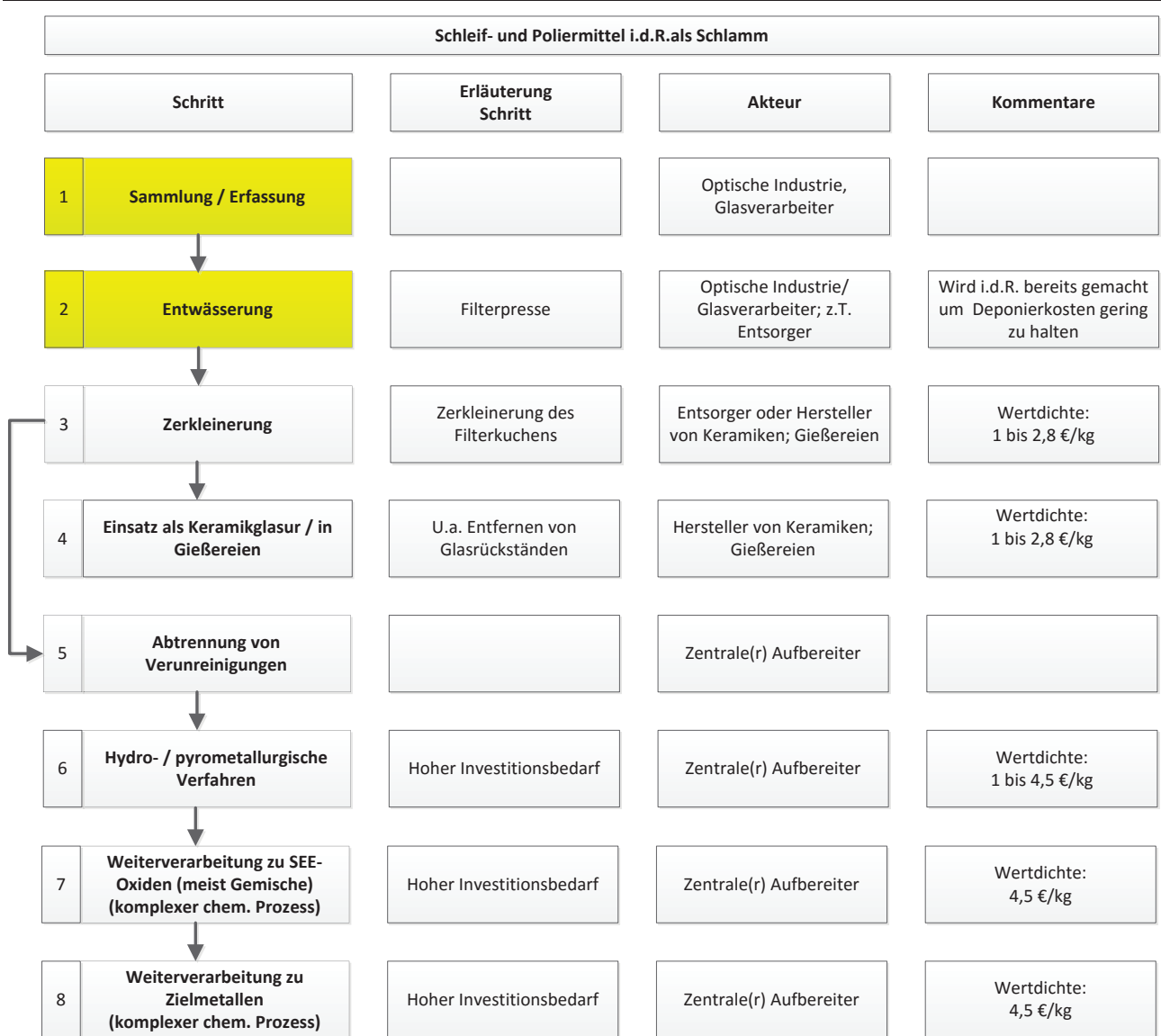
Nach der getrennten Sammlung und Erfassung der Poliermittel beim Erzeuger werden diese in der Regel entwässert. Zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle könnten die Poliermittel relativ problemlos durch Entsorger einer zentralen Aufbereitungsanlage zugeführt werden.

Nach der Zerkleinerung des Filterkuchens können Verunreinigungen, wie z. B. Glasrückstände mit Löseprozessen entfernt werden. Anschließend können über pyro- oder hydrometallurgische Verfahren die Seltenerdmetalle wiedergewonnen werden. Allerdings ist der hierzu erforderliche Aufwand angesichts der geringen Wertschöpfung und der geringen Mengen wirtschaftlich nicht darstellbar. Zudem erfolgt in den Unternehmen oft keine Trennung zwischen Polier- und Schleifmitteln, was zu weiteren Verunreinigungen, z.B. mit Korund führt, deren Abtrennung im Prozess teilweise problematisch ist.

Wesentlich weniger aufwendig wäre z.B. Einsatz in Keramikglasuren, wo Cer 1:1 ersetzt werden könnte. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass Poliermittel sich nicht nur in der Zusammensetzung unterscheiden, sondern je nach Einsatzbereich über den Glasabrieb alle Bestandteile der bearbeiteten Gläser enthalten. Es ist somit vom Einzelfall abhängig, ob dadurch enthaltene Substanzen dem vorgesehenen Einsatz im Wege stehen.

Auch ein Einsatz zur Mischmetallerzeugung in Gießereien ist eine denkbare Anwendung, in der Cer 1:1 ersetzt würde.

Abbildung 13: Schleif- und Poliermittel - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.



Separierte FCC-Katalysatoren

Die Aufbereitung von Katalysatorrückständen könnte nach der Erfassung bei einem zentralen Aufbereiter über hydro- oder pyrometallurgische Verfahren erfolgen.

Abbildung 14: FCC-Katalysatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

FCC-Katalysatoren			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung / Erfassung	Raffinerien zur Erdölverarbeitung	
2	Aufbereitung Katalysator-Rückstände	Zentrale(r) Aufbereiter	Wertdichte: 0,1 €/kg
3	Hydro- / pyrometallurgische Verfahren	Hoher Investitionsbedarf	Zentraler Aufbereiter (vsl. einer; evtl. 3=4) Wertdichte: 0,1 bis 4,5 €/kg
4	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer chem. Prozess)	Hoher Investitionsbedarf	Zentraler Aufbereiter (vsl. einer; evtl. 3=4) Wertdichte: 4,5 €/kg

Separierte Autokatalysatoren

Autokatalysatoren werden bereits ausgebaut und zerlegt. Aus den bei der Aufbereitung anfallenden Schlackerückständen könnten bei einem zentralen Aufbereiter nach einer Zerkleinerung über hydro-metallurgische Verfahren die SE-Metalle wiedergewonnen werden. Die Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Schlacke wird im Projekt MinSEM untersucht (CUTEK 2016).

Abbildung 15: Katalysatoren aus Altfahrzeugen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Katalysatoren aus Altfahrzeugen			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1 Rücknahme von Altfahrzeugen		Behördlich anerkannte Annahmestellen und Rücknahmestellen	
2 Ausbau / Zerlegung der Katalysatoren		Altfahrzeugdemontagebetrieb	
3 Aufbereitung der Autokatalysatoren (Katalysatorträger = Monolith)		Zentraler Aufbereiter	
4 Hüttenprozesse / Scheideanstalt		Zentraler Verwerter	
5 Mechanische Aufbereitung Schmelzrückstände ²	Zerkleinerung	Zentraler Aufbereiter	Wertdichte: << 4,5 €/kg
6 Nasschemische Behandlung ²	Abtrennung mineralischer Reststoffe	Zentraler Aufbereiter	Wertdichte: < 4,5 €/kg
7 Einsatz ionischer Flüssigkeiten ²	Abtrennung von Platingruppenmetalle	Zentraler Aufbereiter	Wertdichte: max. 4,5 €/kg
8 Weiterverarbeitung zu Zielmetallen	Rückgewinnung hochreiner Metalle	Zentraler Verwerter	Wertdichte: 4,5 €/kg

NiMH-Batterien

Der bei der Aufbereitung von NiMH-Batterien anfallende seltenerdmetallhaltige Mischmetallschrott kann bei einem zentralen Aufbereiter weiter aufbereitet werden. Es gibt einige Studien, die sich mit der Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Batterien beschäftigt haben. Eine Übersicht findet man bei Binnemans et al. (Binnemans et al. 2013; S. 1-22). Die Firma Umicore hat zusammen mit Rhodia 2011 bekannt gegeben, dass beide einen Prozess zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus NiMH-Batterien entwickelt haben. Der Prozess basiert auf dem Ultra-High-Temperature-Verfahren

von Umicore. Eine Pilotanlage mit einer jährlichen Kapazität von 7000 t wurde in Hoboken (Belgien) in Betrieb genommen. Neben NiMH-Batterien können in der Anlage auch Li-Ionen-Batterien verwertet werden. Nach der pyrometallurgischen Abtrennung von Nickel, Kobalt, Kupfer und Eisen wird die seltenerdmetallhaltige Schlacke aufbereitet. Die gewonnenen Seltenerdmetallkonzentrate können in der Seltenerdmetall-Trennanlage von Solvay (ehemals Rhodia) in La Rochelle (Frankreich) eingesetzt werden (Sander et al. 2017; S. 361).

Abbildung 16: Ni(MH)Batterien - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

SEE aus Ni(MH)-Batterien			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung Altbatterien	Privat und kommunale Sammelstellen nach BattG	
2	Identifizierung Ni(MH)-Batterien	Sortierung nach elektrochemischen System	Wertdichte: ca. 10 €/t
3	Mechanische Vorzerlegung	Entfernung der Kunststoffgehäuse	Wertdichte: ca. 10 €/t
4	Mechanische Aufbereitung	Entfernung Wasserstoff und Kunststoffe	Wertdichte: ca. 10 €/t
5	Pyrometallurgische Abtrennung der Ni-Co-Legierung	Entfernung Co, Ni, Fe	Wertdichte: 0 bis 1,5 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
6	Metallurgische Aufbereitung der Schlacke	Gewinnung SEE-Verbindungen	Wertdichte: 0 bis 1,5 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
7	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer chemischer Prozess)	Schmelzflusselektrolyse	Wertdichte: 10 bis 15 €/kg Info: Qualitätsanforderungen

2.4.6.3 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Polierschlämme

Die Recycling-Kette beginnt mit der Sammlung in der optischen Industrie. Im nächsten Schritt findet die Deponierung durch Entsorger statt. Eine Aufbereitung erfolgt derzeit nicht und müsste nach der Sammlung als Prozess implementiert werden.

Tabelle 53: Mengengerüst Cer und Lanthan aus Polierschlämmen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Mengenpotenzial Zielmetalle für 2020: ca. 90t Cer und 3t Lanthan Gesamt: 93 t Tendenz zukünftige Mengen: gleichbleibend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg: 4,50 € für Cer und Lanthan (Neuwarenwert) Gesamt: 419.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Aufbereitungseinheit	Annahme: 1 Aufbereiter Gesamt: 1938 kg / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Aufbereitungseinheit	ca. 8.700 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)

Separierte FCC-Katalysatoren

FCC-Katalysatoren werden zum Cracken in der Petrochemie eingesetzt. Da der Einsatz in etwa 13 Raffinerien in Deutschland erfolgt (Mineralölwirtschaftsverband 2018), fallen auch die gebrauchten Katalysatoren konzentriert auf wenige Standorte an. Der Prozess der Erfassung ist bereits etabliert. Die Katalysatoren werden im weiteren Verlauf in Zementwerken eingesetzt oder deponiert. Eine Aufbereitung findet derzeit nicht statt.

Das Mengengerüst stellt sich nach vorliegenden Daten wie folgt dar.

Tabelle 54: Mengengerüst Cer und Lanthan aus FCC-Katalysatoren (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge Katalysatoren: ca. 9.400 t (Hassan 2003; S. 11) Mengenpotenzial Zielmetalle für 2020: ca. 80t Cer und 170t Lanthan Gesamt: 250 t Tendenz zukünftige Mengen: gleichbleibend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg: 4,50 € für Cer und Lanthan (Neuwarenwert) Gesamt: 1.125.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkom-	Annahme: 1 Aufbereiter

men pro Aufbereitungseinheit	Gesamt: 5.200 kg / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Aufbereitungseinheit	ca. 23.400 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)

FCC Katalysatoren werden heute gesammelt und zur Deponierung oder Verwertung in Zementwerken transportiert. Es gibt bereits ein logistisches Sammelsystem. Für die Verwertung der Katalysatoren könnte das System weiter genutzt werden. Dabei verändern sich die Ziele: Statt Deponien werden Aufbereiter angefahren. Da diese in Deutschland in geringerer Anzahl vorhanden sind als Deponien werden die Distanzen länger. Dies treibt die logistischen Kosten, allerdings i.d.R. deutlich unterproportional zur Transportdistanz. Um die Kosten unter Kontrolle zu halten, wird empfohlen die Katalysatoren so lange zu lagern, dass Ganzladungen zustande kommen. Bei 13 Raffinerien und 9.400 t Aufkommen pro Jahr sind 723 t pro Raffinerie anzunehmen. Das macht ca. 18 Sattelzüge (á 40t) pro Raffinerie und damit eine Transportfrequenz von monatlich einem Sattelzug. Daraus ergibt sich ein Lagerbedarf von 40t über 20 Tage. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies in den bestehenden Einrichtungen unproblematisch ist. Zu prüfen wäre ein System, bei dem direkt im Sattelzugauflieger bzw. einem Spezialauflieger gelagert werden kann, das reduziert die Verladezeit bei Abholung.

Bei Raffinerien und bei zentralen Aufbereitern kann ein Gleisanschluss angenommen werden. Dieser wird bei Raffinerien i.d.R. für den Abtransport der petrochemischen Produkte genutzt und bei Aufbereitern aufgrund der groß-industriellen Verfahren zur Anlieferung voluminöser Stoffströme. Um einen Ganzzug zu füllen, müssten 1.600 t (das 40fache eines LKWs) gesammelt werden. Dazu wäre ein Lagervolumen von etwa zwei Jahresaufkommen nötig. Das drückt massiv die Transportkosten, führt aber zu Lageraufwand und Verladungsaufwänden. Daher wird dies nur dann als praktikabel erachtet, wenn die Lagerflächen und Verlademöglichkeiten für eine Bahnverladung gegeben sind.

Dies wird aber nur stattfinden, wenn in eine Aufbereitungsanlage zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle investiert wird. Entscheidend wird sein, ob sich diese Investition rechnet.

Separierte Autokatalysatoren

Aus den ordnungsgemäß zur Verwertung zurückgegebenen Altfahrzeugen werden die Katalysatoren ausgebaut und der metallurgischen Rückgewinnung der Edelmetallanteile zugeführt. In den dabei erhaltenen Schlacken sammeln sich die Seltenerdmetalle. Den letzten Schritt in der Kette stellt die Separation der Zielmetalle aus diesen Schlacken dar.

Das Mengengerüst stellt sich wie folgt dar.

Tabelle 55: Mengengerüst Gewinnung von Cer und Lanthan aus Autokatalysatoren (Annahme: 48 Verarbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Ce, La)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Gesamtmenge Schlacken aus Aufbereitung von Autokatalysatoren: Ca. 3.000t Mengenpotenzial Zielmetalle für 2020: ca. 120t Cer und 8t Lanthan Gesamt: 128 t Tendenz zukünftige Mengen: gleichbleibend
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg: 4,50 € für Cer und Lanthan (Neuwarenwert) Gesamt: 576.000 €

	Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Aufbereitungseinheit	Annahme: 1 Aufbereiter Gesamt: 2.670 kg / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Aufbereitungseinheit	ca. 12.000 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)

Die Aufbereitung der Zielmetalle Cer und Lanthan ist logistisch unkritisch da die Ausgangsstoffe bereits gebündelt beim zentralen Aufbereiter vorliegen.

Entscheidend wird sein, ob die Investition in eine Aufbereitungsanlage getätigt wird.

2.4.6.4 Bündelungskonzept

Eine Bündelung von Abfällen aus allen Quellen wäre zur Steigerung der Verarbeitungsmengen schon deshalb kaum zielführend, weil für die sehr unterschiedlich zusammengesetzten Abfallströme nicht ein und derselbe Aufbereitungsprozess geeignet wäre.

Die größte Herausforderung bei einer Realisierung von Aufbereitungsprozessen für alle Cer- und Lanthan-haltigen Abfallströme ist der geringe Wert der Metalle. Wirtschaftliche Lösungen, die mit dem Aufbau aufwendiger und investitionskostenintensiver Aufbereitungsprozesse verbunden wären, sind daher nicht in Sicht.

Die Analyse der Einzelmengen führt zu folgenden Ergebnissen:

- FCC-Katalysatoren: Aufgrund geringer Konzentrationen der Metalle in den Katalysatoren (vgl. Kapitel 2.4.6.1) scheint eine Rückgewinnung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Damit entfällt das größte Mengenpotenzial der Cer- und Lanthan-haltigen Abfallströme.
- Spezialgläser und Keramiken: Gegen eine Bündelung und den Aufbau einer Verwertungslösung sprechen auch hier insbesondere die geringen Konzentrationen der Zielmetalle sowie der Einzelmengen (vgl. Kapitel 2.4.6.1). Zudem sind die in diesem Teilabfallstrom enthaltenen Strahlenschutzgläser radioaktiv belastet.
- NiMH-Batterien: Verfahren zur Verwertung der Mischmetallfraktion aus der Aufbereitung der Batterien sind grundsätzlich verfügbar. Sie werden jedoch wegen des geringen Materialwertes von Cer und Lanthan bei großem Aufwand zur Gewinnung der Seltenerdmetallkonzentrate nicht realisiert. Eine Mengenbündelung innerhalb der Gruppe NiMH-Batterien ist bereits heute durch Aufbereitung von Batterien an wenigen Standorten weitgehend gegeben.
- Autokatalysatoren: Die Schlacken aus der Aufbereitung von Autokatalysatoren liegen bereits gebündelt beim Katalysatorverwerter vor. Eine weitere Mengenbündelung mit anderen Abfallströmen erscheint wegen der erforderlichen Unterschiede in den Aufbereitungsprozessen nicht zweckmäßig.
- Polierschlämme: Einer Aufbereitung mit dem Ziel der Gewinnung von Seltenerdmetallkonzentrat steht auch hier der große Aufwand bei geringen Materialwerten entgegen. Gleichzeitig kommen aber aufgrund der hohen Cer-Gehalte in den Schlämmen Verwertungspfade in Frage, die wesentlich weniger aufwendig sind, nämlich der Einsatz in der Keramikglasur oder auch in Gießereien. Auch der Realisierung dieser Pfade stehen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen im

Wege, allerdings ist die Schwelle hier wesentlich niedriger. Wichtiger scheinen hier zudem Vorbehalte bezüglich möglicher Nebenbestandteile in den Schlämmen zu sein, welche die Produkt- oder die Prozessqualität bei der Verarbeitung beeinträchtigen könnten. Hier sollte geprüft werden, ob durch konsequente und transparente Analyse- und Qualitätssicherungsmaßnahmen entlang der Wertschöpfungskette vom Anfall der Schlämme bis hin zum Einsatz in Keramikglasur oder Gießereien störende Kontaminationen ausgeschlossen werden können. Auch die Möglichkeit, für diese Abfälle nach entsprechender (möglichst wenig aufwendiger) Aufbereitung und Qualitätssicherung Produktstatus zu erlangen sollte geprüft werden. So könnte es gelingen, das Vertrauen möglicher Abnehmer in das Material zu stärken und einen Markt dafür aufzubauen. Bei der Bündelung von Einzelmengen müssen dabei aber unbedingt die Unterschiede in der Zusammensetzung der Polierschlämme im Blick behalten werden. Solche Unterschiede werden bei Schlämmen unterschiedlicher Anwender der Poliermittel auftreten, sie sind aber auch im zeitlichen Verlauf an einer Quelle möglich, etwa durch Wechsel im Produktspektrum oder Änderungen in den Prozessen. Für eine Prüfung und ggfs. Initiierung dieser Verwertungspfade bietet sich die Durchführung eines Workshops an, in dem große Glasbearbeitungsunternehmen, in denen Polierschlämme anfallen, zusammengebracht werden mit Keramikherstellern und Gießereien, interessierten Entsorgern sowie deren Verbänden.

2.4.6.5 Maßnahmenoptionen

Initiierung eines Workshops mit möglichen Beteiligten der Prozessketten zum Einsatz von Polierschlämmen in Keramikglasur oder Gießereien. Als Teilnehmer kämen insbesondere Unternehmen in Frage, die große Mengen an Poliermitteln einsetzen, Gießereien, Hersteller von Keramikprodukten und ggfs. Entsorger.

2.4.7 Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe

2.4.7.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Tabelle 56 zeigt eine Übersicht der Potenziale an Seltenerdmetallen in Leuchtstoffen aus Leuchtstofflampen, CRT-Geräten und LCD-Geräten.

Tabelle 56: Mengen- und Wertpotenziale an Seltenerdmetallen in Leuchtstoffen aus unterschiedlichen Einsatzbereichen. Die Herleitung der Mengenpotenziale in Deutschland wird im Text erläutert.

Anwendungsbereich	Menge und Wert Seltenerdmetalle				Trend
	Deutschland		Deutschland u. angrenzende Staaten (in Klammern: EU gesamt)		
	[t/a]	[T €]	[t/a]	[T €]	
Leuchtstofflampen ¹	20	1800	51 (100)	4590 (9.000)	Sinkend
CRT-Geräte ²	3,75	364	9,6 (18,75)	928 (1820)	Stark sinkend
LCD-Geräte ³	0,4	42	1	107	Sinkend

			(2)	(208)	
Summe	24,15	2206	61,6 (120.75)	5625 (1028)	sinkend

[1] Leuchtstofflampen: Anteile SEE an Marktmix SEE-Leuchtstoffe Welt: Y 64%; Ce 17%; Pr 6%; La 5%; Eu 4%; Gd, Tb, Nd je 2%; Er 1% (European Commission 2014; S. 154) Neuwarenwert SEE im SEE-Leuchtstoffmix: 90 €/kg (Y 39€, Eu 2€, Tb 13 €, Pr 7 €, übrige 6 €)

[2] CRT-Geräte: Typische Anteile SEE am Leuchtstoff: 23,2% Yttrium und 1,5% Europium

[3] LCD-Geräte: Anteile SEE am SEE-Marktmix für Leuchtstoffe: :64% Yttrium, 17% Cer, 6%Praseodym, 5%Lanthan, 4% Europium, je 2% Gadolinium, Terbium und Neodym, 1% Erbium; Neuwarenwert SEE: 104 €/kg SEE-Mix;

Anm.: Quelle für SEE-Preise: USGS 2017

Leuchtstofflampen

Seltenerdmetalle werden in Leuchtstoffe für Leuchtstofflampen eingesetzt. Pro Lampe werden ca. 1-3 Gewichts-% Leuchtstoff eingesetzt. Dieser besteht in der Regel aus einem Wirtsgitter (BaO, Al₂O₃, MgO, Y₂O₃, etc.), Phosphaten, Sulfaten oder Silikaten und einer Dotierung mit Aktivatoren. Als Aktivatoren werden unter anderem Seltenerdmetallionen (Yttrium, Europium) verwendet (Kranert et al. 2013; S. 11). Der Leuchtstoff enthält ca. 10-20 % Seltenerdmetalle (Luidold et al. 2013; S. 227). Im Jahr 2014 wurden ca. 6.800 t Gasentladungslampen gesammelt (BMUB 2017), was einer Menge von 68 – 204 t Leuchtstoff entspricht. Bei einem angenommenen Anteil des Leuchtstoffs an der Lampenmasse von 15 % und einem angenommenen Seltenerdmetallanteil am Leuchtstoff von 2 Masse% ergibt sich eine Menge an Seltenerdmetallen von 20 t/a.

Leuchtstofflampen werden in den letzten Jahren immer mehr von LED-Lampen verdrängt. Die Produktion von Gasentladungslampen ist drastisch zurückgegangen. Die in Deutschland in Verkehr gebrachte Menge ist seit 2014 um mehr als 40% gesunken. Heute kommen Lampen zurück, die etwa 10 Jahre alt sind. In 15 bis 20 Jahren dürften immer noch etwa eine Milliarde Lampen im Markt sein und damit auch noch größere Mengen an Leuchtstoffen anfallen.³⁷ Die Menge wird jedoch kontinuierlich sinken.

Die Sammlung von Leuchtstofflampen ist über das ElektroG geregelt. Leuchtstofflampen werden meist zusammen mit anderen Lampen (z. B. LED-Retrofits) in der Sammelgruppe 4 gesammelt. Nach der Sammlung werden die Lampen bei einem Aufbereiter nach dem Typ sortiert. Die leuchtstoffhaltige Feinfraktion wird bei der weiteren Aufbereitung abgetrennt und derzeit deponiert.

Tabelle 57: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Leuchtstofflampen zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der Leuchtstofflampen wird nicht ordnungsgemäß entsorgt.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Ja
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja, die erfassten Lampen werden wenigen zentralen Aufbereitungsanlagen zugeführt.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Ja
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, bei den Altlampenaufbereitern
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja

³⁷ Persönliche Auskunft Lightcycle Retourlogistik und Service GmbH

CRT-Geräte

CRT-Geräte enthalten zwischen 7 und 15 g Leuchtstoff pro Bildschirm (Luidold et al. 2013; S. 13). Bei einem Durchschnittsgewicht pro Gerät von 28 kg (Jehle 2011; S. 17) ergibt sich ein Gewichtsanteil an Leuchtstoff im Bildschirm von 0,025 – 0,05 %. Im Jahr 2007 wurden 1.435.000 CRT-Geräte in Deutschland verkauft (Jehle 2011; S. 6). Das entspricht bei einer Verwendungsdauer von 10 Jahren einer Gesamtabfallmenge von 40.200 t CRT-Geräten bzw. von 10 bis 20 t Leuchtstoffmitteln im Jahr, die einen typischen Gehalt von 23,2% Yttrium und 1,5% Europium aufweisen. Damit ergibt sich eine Seltenerdmetallmenge von ca. 2,5-5,0 t/a Die Leuchtstoffe bestehen im Wesentlichen aus Halophosphat, Zinksulfid und Seltenerdmetallen (v. a. Yttrium, Europium). Die Sammlung von CRT-Geräten ist in Deutschland über das ElektroG geregelt. Sie erfolgt zusammen mit anderen Bildschirmgeräten in Sammelgruppe 3. CRT-Geräte sind mit der Einführung von flachen LCD-, Plasma- und LED-Bildschirmen vom Markt verdrängt worden. Die Abfallmengen sind daher in den letzten Jahren stark gesunken.

Nach dem Transport von der Sammelstelle zu einem der 439 Elektroaltgeräte-Erstbehandler (ear-Portal 2018) für Elektro- und Elektronikaltgeräte findet zunächst eine Sortierung nach Gerätetyp statt. Anschließend erfolgt die Trennung der Front- und Konusgläser z. B. mittels Heißdrahttechnik. Danach wird die Leuchtschicht abgesaugt. Nach Anlage 4 Nr. 4 lit. a ElektroG muss die fluoreszierende Schicht bei Kathodenstrahlröhren entfernt werden. Die verschiedenen Glassorten, sowie abgetrennte Metallteile können einer Verwertung zugeführt werden. Die Leuchtschicht wird i. d. R deponiert.

Tabelle 58: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von CRT-Geräten zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der CRT-Geräte wird nicht ordnungsgemäß entsorgt
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Ja, die Erfassung erfolgt in einer separaten Sammelgruppe zusammen mit anderen Bildschirmgeräten; die gemeinsame Erfassung erscheint für CRT-Geräte eher unkritisch
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja, die Zielmetalle werden bei den Erstbehandlern mit den Leuchtstoffen abgetrennt und könnten von diesen einer Verwertung zugeführt werden wenn eine solche Möglichkeit besteht
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, wenn Verwerter existieren, die die Leuchtstoffe annehmen
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Ja, s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, s.o.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja, s.o.

LCD-Geräte

In LCD-Geräten kommen seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe in der CCFL-Hintergrundbeleuchtung zum Einsatz. Menge und Größe der CCFL-Kapillarröhren variieren dabei sehr stark. Während in Notebooks pro Gerät im Schnitt nur eine Röhre mit einem Durchschnittsgewicht von 1 g verwendet wird, werden in Fernsehern im Schnitt 15 Stück mit einem Durchschnittsgewicht von je 4 g eingesetzt. Jede Kapillarröhre enthält ca. 2,1 % Leuchtstoff. Der Anteil der Seltenerdmetalle (hauptsächlich Yttrium und Europium) an den Leuchtstoffen beträgt ca. 10 % (Buchert et al. 2012; S.10).

Im Jahr 2016 wurde mit einem Recyclingaufkommen von ca. drei Mio. Stück, basierend auf Verkaufszahlen und einer durchschnittlichen Verwendungsdauer von acht Jahren, gerechnet (Fröhlich 2015; S. 316). Bei einem Durchschnittsgewicht von 6,9 kg (Bakas et al 2016; S.21) ergibt dies eine Gesamtmenge an Geräten von 21.075 t Altgeräten. Bei einem Anteil von 0,31-0,93 % (Fröhlich 2015; S. 315) Hintergrundbeleuchtung pro Gerät ergibt sich ein Gesamtaufkommen an Hintergrundbeleuchtung von 65-196 t im Jahr 2016. Bei einem typischen Gehalt von 0,13 g Seltenerdmetalloxiden pro Gerät (Buchert et al., 2012; S. 11) ergibt sich eine Masse an Seltenerdmetallen von 0,4 t/a. Es ist mit einem Rückgang der Rücklaufmenge in den kommenden Jahren auf ca. 2.900.000 Stück im Jahr 2020 zu rechnen.

Für die Hintergrundbeleuchtung wird seit mehreren Jahren vermehrt LED-Technik eingesetzt. LED enthalten ebenfalls einen seltenerdmetallhaltigen Leuchtstoff, allerdings in wesentlich geringerer Menge.

Die Sammlung von LCD-Geräten unterliegt in Deutschland dem ElektroG. Sie erfolgt zusammen mit anderen Bildschirmen, Monitoren und TV-Geräten in Sammelgruppe 3. Nach dem Transport zu einem von 439 Elektroaltgeräte-Erstbehandlern (ear-Portal 2018) werden die unterschiedlichen Gerätetypen getrennt. Nach Anlage 4 Nr. 1 lit. j ElektroG sind die LCD-Anzeigen (gegebenenfalls mit Gehäuse) mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm² sowie hintergrundbeleuchtete Anzeigen mit Gasentladungslampen auszubauen. Zudem müssen Gasentladungslampen aus erfassten Altgeräten entfernt werden. Die CCFL-Lampen werden nach der Abtrennung dem allgemeinen Lampenrecycling zugeführt. Nach der Entfernung von Quecksilber werden die Leuchtstoffe mit eventuellen Verunreinigungen durch Glasbruch, Quecksilber und anderen Stoffen i. d. R. deponiert (Buchert et al. 2012; S. 21).

Tabelle 59: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von LCD-Geräten zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der LCD-Geräte wird nicht ordnungsgemäß entsorgt
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Nein, die Erfassung erfolgt in einer Sammelgruppe unter anderem zusammen mit CRT-Geräten; bei dieser Art der Sammlung kommt es häufig zu Beschädigungen der LCD-Displays
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja, die Zielmetalle werden bei den Erstbehandlern mit den Leuchtstoffen abgetrennt und könnten von diesen einer Verwertung zugeführt werden wenn eine solche Möglichkeit besteht
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, wenn Verwerter existieren, die die Leuchtstoffe annehmen
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückge-	Ja, s.o.

winnung der Zielmetalle effizient?	
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, s.o.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja, s.o.

2.4.7.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Die Abtrennung von Leuchtstoffen ist bei Leuchtstofflampen, CRT-Geräten und LCD-Geräten bereits Stand der Praxis. Über einen zentralen Aufbereiter könnten die Leuchtstoffpulver gesammelt und einer gemeinsamen Verwertung zugeführt werden. Die Abtrennung der Seltenerdmetalle kann dabei über hydrometallurgische Verfahren erreicht werden. Eine Übersicht über Recyclingkonzepte für Leuchtstoffmittel findet man bei Binnemans et al. (Binnemans et al. 2013; S. 1 – 22). Die Firma Rhodia (heute Solvay) gab 2011 bekannt, ein Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Leuchtstoffen entwickelt zu haben, mit dem 95 % der Seltenerdmetalle wiedergewonnen werden können. Das Verfahren umfasst sowohl hydro- als auch pyrometallurgische Prozesse. Zunächst wird dabei ein Seltenerdmetall-Konzentrat abgetrennt. Dieses kann anschließend in der Seltenerdmetall-Trennanlage in La Rochelle weiter aufbereitet werden. Bei dem Verfahren wird neben den Seltenerdmetallen auch P_2O_5 wiedergewonnen. Dieses Verfahren wurde in Hochpreisphasen praktiziert, inzwischen ist der Prozess aber aus Wirtschaftlichkeitsgründen eingestellt. OSRAM hat ebenfalls ein hydrometallurgisches Verfahren zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle aus Leuchtstoffen entwickelt (Binnemans, Jones 2013; S. 195 – 200).

Abbildung 17: Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung Altlampen	Privatw. und kommunale Sammelstellen nach ElektroG	
2	Sortierung nach Lampentyp	Altlampensortieranlage / -aufbereiter	
3	Abtrennung Leuchtstoffhaltige Feinfraktion in der Altlampenaufbereitung	Verschiedene Verfahren => unterschiedliche Verunreinigungsgrade	Wertdichte: 3 €/kg in diesem Schritt meist zugleich Entquickung
4	Abtrennung Fremdstoffe	V.a. Glasanteile	Wertdichte: 9 €/kg Festplatten
5a	Einsatz als Leuchtstoff	Lampenhersteller	Wertdichte: 9 €/kg
5b	Abtrennung SEE-Konzentrat	Entfernung Halophosphate und Aluminate	Wertdichte: 50 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
6	Weiterverarbeitung zu SEE-Oxiden	Hoher Investitionsbedarf und/oder Nutzung vorhandener Anlagen	Wertdichte: 70 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
7	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer chemischer Prozess)	Hoher Investitionsbedarf	Wertdichte: 90 €/kg Info: Qualitätsanforderungen

Abbildung 18: Leuchtstoffe aus CRT-Geräten - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Leuchtstoffe aus CRT			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung Elektroaltgeräte	Privatw. und kommunale Sammelstellen nach ElektroG	
2	Identifizierung von CRT	Erstbehandler / Demontagebetrieb	
3	Ausbau der Bildschirnröhre	Erstbehandler / Demontagebetrieb	
4	Abtrennung Leuchtschicht bei der mechanischen Zerlegung	Erstbehandler / Demontagebetrieb	Wertdichte: 10 bis 15 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
5	Abtrennung SEE-Konzentrat	Abtrennung ZnO, SiO ₂ ... Leuchtstoffaufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: 10 bis 24 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
6	Weiterverarbeitung zu SEE-Oxiden	Hoher Investitionsbedarf und/oder Nutzung vorhandener Anlagen Leuchtstoffaufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: 24 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
7	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer chemischer Prozess)	Hoher Investitionsbedarf Zentrale(r) Aufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: > 24 €/kg Info: Qualitätsanforderungen

Abbildung 19: Leuchtstoffe aus LCD - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Leuchtstoffe aus LCD			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung Elektroaltgeräte	Privatw. und kommunale Sammelstellen nach ElektroG	
2	Identifizierung von LCD mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung	Erstbehandler / Demontagebetrieb	
3	Ausbau von LCD mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung	Erstbehandler / Demontagebetrieb	
4	Ausbau Lampen (manuell)	Demontagebetrieb	Wertdichte: ca. 0,2 /kg
5	Abtrennung leuchtstoffhaltige Feinfraktion in der Altlampenaufbereitung	Altlampenaufbereiter	Wertdichte: 2 €/kg in diesem Schritt zugleich Entquicklung
6	Abtrennung Fremdstoffe	Altlampenaufbereiter oder Leuchtstoffaufbereiter	Wertdichte: 10 €/kg Festplatten
7	Abtrennung SEE-Konzentrat	Entfernung Halophosphate und Aluminate Leuchtstoffaufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: 70 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
8	Weiterverarbeitung zu SEE-Oxiden	Hoher Investitionsbedarf und/oder Nutzung vorhandener Anlagen Zentrale(r) Aufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: 85 €/kg Info: Qualitätsanforderungen
9	Weiterverarbeitung zu Zielmetallen (komplexer chemischer Prozess)	Hoher Investitionsbedarf Zentrale(r) Aufbereiter (vsl. einer)	Wertdichte: 104 €/kg Info: Qualitätsanforderungen

2.4.7.3 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Gasentladungslampen

Die Recycling-Kette beginnt mit der Sammlung und Rücknahme von Altlampen. Diese können bei kommunalen Sammelstellen, Herstellern, Handel und Elektrowerk zurückgegeben werden. Insgesamt gibt es mehr als 11.000 Sammelstellen (abgeleitet aus Umweltbundesamt 2018b). Eine Direktabholung erfolgt ebenfalls. Der Prozess der Rücknahme ist bereits etabliert. Alle Lampen werden anschließend nach Typ sortiert. Anschließend werden die Leuchtstoffe abgetrennt. Sie könnten so einer Aufbereitung zu marktfähigen Produkten zugeführt werden.

Das Mengengerüst stellt sich wie folgt dar.

Tabelle 60: Mengengerüst Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen (Annahme: 48 Verarbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Mengenpotenzial Zielmetalle für 2020: 20 t Seltenerdmetalle Tendenz zukünftige Mengen: abnehmend
Wertpotenzial / Jahr	Wert Seltenerdmetalle pro kg: 90 € Gesamt: 1,8 Mio. € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Aufbereitungseinheit	Annahme: 1 Aufbereiter 20 t Seltenerdmetalle / Jahr 416 kg Seltenerdmetalle / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Aufbereitungseinheit	1,8 Mio. € Umsatz / Jahr 37.500 € / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Mengen- und Wertpotenzial	Menge Leuchtstoff pro Lampe ca. 1,5 – 4,5 g (davon ca. 10 % SEE-Oxide) (abgeleitet aus Kranert et al. 2013, S. 54) Wert pro Lampe ca. 0,03 €

LCD-Bildschirmgeräte

Die Recycling-Kette beginnt mit der Rücknahme der Elektroaltgeräte. Diese können bei kommunalen Sammelstellen, Herstellern, Handel und Elektrohandwerk zurückgegeben werden. Insgesamt gibt es mehr als 11.000 Sammelstellen (abgeleitet aus Umweltbundesamt 2018b). Der Prozess der Rücknahme ist bereits etabliert. Die Elektroaltgeräte gehen im weiteren Verlauf an einen Demontagebetrieb. Dort werden die LCD-Anzeigen mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung sowie die Lampen ausgebaut. Dieser Schritt ist ebenfalls bereits etabliert. Die Lampen werden dann einem Altlampenaufbereitungsbetrieb zugeführt. Den letzten Schritt in der Kette stellt ein Verwertungsbetrieb dar, der die Leuchtstoffe zu marktfähigen Produkten aufbereitet.

Die logistische Situation stellt sich nach vorliegenden Daten wie folgt dar.

Tabelle 61: Mengengerüst Leuchtstoffe aus LCD-Anzeigen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials der Zielmetalle (Seltenerdmetalle)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Mengenpotenzial Zielmetalle für 2020: 0,4 t Seltenerdmetalle Tendenz zukünftige Mengen: abnehmend
Wertpotenzial / Jahr	Wert Seltenerdmetalle pro kg: 105 € Gesamt: 42.000 € Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Aufbereitungseinheit	Annahme: 1 Aufbereiter 0,4 t Seltenerdmetalle / Jahr 8,3 kg Seltenerdmetalle / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Aufbereitungseinheit	42.000 € Umsatz / Jahr 875 € / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Mengen- und Wertpotenzial	Menge Leuchtstoff pro LCD-Anzeige ca. 1,3 g (davon ca. 10 % SEE-Oxide) (CCFL-Kapillarröhre (Durchschnittsgewicht 4 g/Stk.; durchschnittliche Anzahl pro Gerät 15, Anteil Leuchtstoffmittel 2,1 %, Anteil SEE an Leuchtstoffmittel 10,1 %) entnommen bzw. abgeleitet aus Buchert 2012, S. 10-11) Wert pro Gerät ca. 0,01 €

2.4.7.4 Bündelungskonzept

Zur weiteren Aufbereitung mindestens eines Teils der Leuchtstoffe zu Seltenerdmetallkonzentraten stehen Verfahren zur Verfügung, die aber derzeit aus Kostengründen nicht betrieben werden.

Sollten die Prozesse wieder in Betrieb genommen werden, könnten die separiert vorliegenden Mengen aus den bestehenden Aufbereitungsprozessen der Lampen und Geräte diesen Anlagen zugeführt werden.

Darüber hinausgehende Bündelungskonzepte für separierte Leuchtstoffe sind aufgrund der geringen und abnehmenden Menge nicht zweckmäßig.

2.4.7.5 Maßnahmenoptionen

Zu diesen Abfallströmen werden keine Maßnahmenoptionen benannt.

2.4.8 Separierte indiumhaltige LCD-Schichten

2.4.8.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Indium-Zinnoxid (ITO) wird in LCD verwendet. ITO besteht zu ca. 90 % aus Indiumoxid und zu 10 % aus Zinnoxid. Dies entspricht einem Massenanteil von 78 % Indium im ITO. Eine Tonne Gesamtgerät enthält damit im Schnitt ca. 12 g Indium (Fröhlich 2015; S. 323). Der Gewichtsanteil von LCD-Panels am Gerät liegt zwischen 5 und 8 % (Böni et al. 2015). Mit einer errechneten Rücklaufmenge von ca. drei Mio. Geräten im Jahr 2016 und einem Durchschnittsgewicht von 6,92 kg pro Gerät ergibt sich eine Gesamtmenge an LCD-Panels zwischen 1.060 und 1.700 t im Jahr. Hier wird mit 1.380 t der Mittelwert angenommen. Zur Abschätzung des Potenzials an Indium in LCD-Schichten wird das Potenzial in Deutschland aus dem Welt-Jahresverbrauch an Indium für LCD-Schichten von 130 t³⁸ abgeleitet. Unter der Annahme, dass der Anteil Deutschlands an dieser Menge dem Anteil Deutschland am Welt-BIP entspricht (4,5%), ergibt sich für Deutschland ein Potenzial von jährlich 6 t Indium.

Die Sammlung von LCD-Geräten unterliegt in Deutschland dem ElektroG. Sie erfolgt zusammen mit anderen Bildschirmen, Monitoren und TV-Geräten in Sammelgruppe 3. Nach dem Transport zu einem von 439 Elektroaltgeräte-Erstbehandlern (ear-Portal 2018) werden die unterschiedlichen Gerätetypen getrennt. Nach Anlage 4 Nr. 1 lit. j ElektroG sind die LCD-Anzeigen (gegebenenfalls mit Gehäuse) mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm² auszubauen. Die komplette manuelle Zerlegung eines Geräts dauert zwischen 8 und 20 Minuten. Schadstoffentfrachtete LCDs können in metallurgischen Prozessen oder Industriemüllverbrennungsanlagen verwertet werden (Umweltpakt Bayern 2009). Das enthaltene Indium geht dabei verloren.

Tabelle 62: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von LCD-Geräten zur Rückgewinnung von Indium

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der LCD-Geräte wird nicht ordnungsgemäß entsorgt.
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgeeigneten Form erfasst?	Nein, die Erfassung erfolgt in einer Sammelgruppe unter anderem zusammen mit CRT-Geräten; bei dieser Art der Sammlung kommt es häufig zu Beschädigungen der LCD-Displays.
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja, die Zielmetalle werden bei den Erstbehandlern mit den Leuchtstoffen abgetrennt und könnten von diesen einer Verwertung zugeführt werden, wenn eine solche Möglichkeit besteht.
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Ja, wenn Verwerter existieren, die die Leuchtstoffe annehmen
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	Ja, s.o.
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, s.o.

³⁸ Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 258

Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja, s.o.
--	----------

2.4.8.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Bei der Sammlung der Geräte ist darauf zu achten, dass ein möglichst zerstörungsfreier Transport bis zur Erstbehandlungsanlage erreicht wird. LCD-Anzeigen enthalten ca. 25 % Kunststoff in Form von Folie auf der Außenseite. Der Glas/Kunststoffverbund muss in einem ersten Schritt gelöst werden, um die kunststofffreie indiumhaltige Glasfraktion zu gewinnen. Dies ist über Pyrolyse, physikalisch-chemische Trennmethode oder elektrische Desintegration möglich. Die Rückgewinnung des Indiums aus dem zerkleinerten ITO-Glas ist mit pyrometallurgischen oder hydrometallurgischen Verfahren möglich. Von Sellin et al. wurde ein solches Verfahren zur Rückgewinnung von Indium aus LCD-Bildschirmen untersucht (Sellin et al. 2016; S. 163-175).

Abbildung 20: LCD-Anzeigen zur Indiumrückgewinnung - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis, gelb schraffiert: teilweise Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Indium aus LCD-Anzeigen			
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare
1	Sammlung Elektroaltgeräte	Privatw. und kommunale Sammelstellen nach ElektroG	
2	Identifizierung LCD-Geräte	Trennung von anderen Bildschirmgeräten (LED, Plasma, OLED)	Erstbehandler / Demontagebetrieb
3	Ausbau LCD-Anzeige (manuell oder automatisch)	ca. 8 - 20 min. bei manueller Zerlegung (komplette Zerlegung!)	Demontagebetrieb
4	Gewinnung indiumreiche Glasfraktion	ca. 1min Zerkleinerung und Abtrennung der Kunststofffraktion	Demontagebetrieb oder zentrale(r) Aufbereiter
5	Hydrometallurgische Gewinnung von Indiumverbindungen	Laugung und Fällung; Hoher Investitionsbedarf	zentrale(r) Aufbereiter
6	Metallurgische Indiumgewinnung	Z. B. Elektrolytisch; Hoher Investitionsbedarf	Zentrale(r) Aufbereiter

2.4.8.3 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Die Recycling-Kette beginnt mit der Rücknahme der Elektroaltgeräte. Diese können bei kommunalen Sammelstellen, Herstellern und Handel zurückgegeben werden. Der Prozess der Rücknahme ist bereits etabliert. Die Elektroaltgeräte gehen im weiteren Verlauf an Demontagebetriebe. Dort werden die LCD-Anzeigen ausgebaut und die indiumreiche Glasfraktion gewonnen. Dieser Prozess findet

teilweise bereits statt. Den letzten Schritt in der Kette stellt die bisher nicht realisierte Aufbereitung der indiumreichen Glasfraktion zu einem marktfähigen Produkt dar.

Tabelle 63: Mengengerüst Indium aus LCD Anzeigen (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Indium)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	Mengenpotenzial Zielmetalle: 6t Indium Tendenz zukünftige Mengen: sinkend Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Indium: 483 € (Neuwarenwert) Gesamt: 3,03 Mio. €
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 439 Demontagebetriebe (Quelle ear-Portal 2018)) 13,9 kg Indium / Jahr 0,29 kg Indium / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	6.902 € Umsatz / Jahr 0,144 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr (tatsächlicher Wert wesentlich kleiner) (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	0,25 Stunden pro Woche
Mengen- und Wertpotenzial	Menge Indium pro Gerät ca. 0,008 bis 0,8 g (abgeleitet aus Böni et al. 2015, S. 19: ca. 0,8 g/m ²) Wert pro Gerät ca. 0,003 bis 0,3 €

Das von Sellin et al. entwickelte teilautomatisierte Verfahren ermöglicht nach Angabe der Entwickler eine effizientere Zerlegung der Geräte mit Separation der indiumhaltigen Glasfraktion. Die Autoren geben an, dass zum Betrieb einer solchen Anlage größere Durchsätze erforderlich sind als derzeit realisierbar.

2.4.8.4 Bündelungskonzept

Der Ausbau von LCD Anzeigen und die Separation der dabei erhaltenen indiumreichen Glasfraktionen finden bereits heute statt. Es fehlt aber derzeit an einer Möglichkeit, aus der Glasfraktion Indium

zurückzugewinnen. Hierzu liegen im Labormaßstab entwickelte Prozesse vor, deren Umsetzung bisher nicht in Sicht ist.

Grundsätzlich könnte eine gesetzliche Vorschrift zweckmäßig sein, die Erstbehandler verpflichtet, die indiumhaltige Glasfraktion aus der Aufbereitung von LCD-Displays separat zu sammeln und einem Verfahren zur Indium-Rückgewinnung zuzuführen. Die Verankerung könnte in der WEEE-RL (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) erfolgen.

Wenn ein solches Verfahren existiert, führt diese rechtliche Vorgabe zu Handlungsdruck. Die Mengenbündelung ergäbe sich dann aus der Erfüllung der Anforderungen automatisch.

Dies setzt allerdings voraus, dass entsprechende Verfahren verfügbar gemacht werden können. Um hier die Investitionsbereitschaft zu stärken, wäre es hilfreich, geeignete Separationsverfahren in den Pilotmaßstab weiterzuentwickeln. Dabei sollten reale Abfälle verarbeitet und darauf aufbauend eine fundierte Stoffstrombilanz und Wirtschaftlichkeitsberechnung erarbeitet werden.

2.4.8.5 Maßnahmenoptionen

Initiierung eines Forschungsprojektes zur Umsetzung der Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen aus LCD-Anzeigen in den Pilotmaßstab mit Erarbeitung fundierter Stoffstrom- und Wirtschaftlichkeitsbilanzen für den Produktionsmaßstab.

Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern (s. auch Kapitel 3, insbes. 3.3.6).

Verpflichtung der Erstbehandler, die indiumhaltige Glasfraktion aus der Aufbereitung von LCD-Displays separat zu sammeln und einem Verfahren zur Indium-Rückgewinnung zuzuführen; Verankerung könnte in der WEEE (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) erfolgen.

2.4.9 Separierte Tantalkondensatoren

2.4.9.1 Abfallströme und Ist-Prozesse

Zur Menge von Tantalkondensatoren, die in Leiterplatten in Deutschland anfallender Elektroaltgeräte enthalten sind, liegen keine belastbaren Zahlen vor.

Die in Deutschland in Tantalkondensatoren eingesetzte Menge an Tantal wird hier wie folgt abgeschätzt: Der Anteil Deutschlands am Welt-Bruttoinlandsprodukt lag 2014 bei 4,5%.³⁹ Von der Welt-Produktionsmenge an Tantal von 1.100 t im Jahr 2016 (USGS 2017; S. 167) werden etwa 60 %, also ca. 660 t in Kondensatoren eingesetzt. Mit der Annahme, dass das in einem Land anfallende Potenzial dem Anteil des Bruttoinlandsprodukts entspricht, ergibt sich für Deutschland eine Menge von knapp 30 t Tantal pro Jahr.

Heute werden separierte Leiterplatten der Edelmetallrückgewinnung zugeführt. Das enthaltene Tantal geht dabei vollständig verloren.

³⁹ Abgeleitet aus Angaben in Online Datenbank der United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), Stand 07.09.2017.

Tabelle 64: Angaben zur Einschätzung des Ist-Zustandes der Erfassung von Leiterplatten zur Rückgewinnung von Tantal aus Kondensatoren

Parameter	Wert
Führt die Art der Erfassung zu einer befriedigenden Erfassungsquote?	Nein, ein großer Teil der Geräte, die Leiterplatten enthalten, wird nicht ordnungsgemäß entsorgt
Werden die Abfälle in einer mit Blick auf die Zielmetalle verwertungsgerechten Form erfasst?	Ja
Ist die Logistik so gestaltet, dass mit Blick auf die Zielmetalle hinreichende Mengenbündelungseffekte auftreten?	Ja
Ist die Logistik so gestaltet, dass die Abfälle mit Blick auf die Zielmetalle geeigneten Akteuren/Verwertungsprozessen zugeführt werden (können)?	Grundsätzlich ja, tantalreiche Leiterplatten könnten aussortiert und der weiteren Separation zugeführt werden
Ist die Logistik mit Blick auf eine mögliche Rückgewinnung der Zielmetalle effizient?	ja
Erfolgt eine mögliche Vorseparation in der Logistikkette an geeigneter Stelle?	Ja, s.o.
Sind die Schlüsselstellen in der Logistikkette in der Hand von Akteuren; die mit Blick auf die Rückgewinnung der Zielmetalle die jeweils erforderlichen Fertigkeiten und Kenntnisse haben?	Ja, die Erstbehandler wären in der Lage, die Kenntnis zur Identifizierung tantalreicher Leiterplatten schnell zu erwerben und solche Leiterplatten auszusortieren

2.4.9.2 Technische Ziel-Verwertungsketten

Abbildung 21 zeigt die Ziel-Verwertungskette zur Separation und Verwertung von Tantal aus Leiterplatten.

Abbildung 21: Tantalcondensatoren - Einbettung der technischen Ziel-Prozessketten in die Ist-Prozesse; gelb hinterlegt: Stand der Praxis. Wertdichte angegeben als Neuwarenwert der Zielmetalle.

Tantalcondensatoren				
Schritt	Erläuterung Schritt	Akteur	Kommentare	
1	Sammlung Elektroaltgeräte	Privatw. und kommunale Sammelstellen nach ElektroG		
2	Identifizierung von Tantalreicher Leiterplatten	Leiterplatten lose oder noch z.B. in PC / Laptop verbaut	Erstbehandler / Demontagebetrieb	Anzahl Tantalcondensatoren kann stark schwanken
3	Ausbau Leiterplatte	Manuelle Demontage 0-2 Minuten	Demontagebetrieb	Wertdichte: bis zu ca. 10 €/kg Leiterplatten
4	Entstückung Leiterplatte	Ca. 4 Minuten	Demontagebetrieb oder zentrale(r) Aufbereiter	Wertdichte: Bis zu ca. 5 bis 15 €/kg Bestückungselemente
5	Siebung und Sortierung der Bestückungskomponenten	< 1 Minute	Demontagebetrieb oder zentrale(r) Aufbereiter	Wertdichte: bis zu ca. 60 €/kg Tantalcondensatoren
6	Weiterverarbeitung zu elementarem Tantal (komplexer chem. Prozess)	Rel. reine Fraktion notwendig	Zentraler Aufbereiter (vsl. einer; evtl. 7=6)	Findet bei sortenreinen Produktionsabfällen bereits statt

Um eine Entstückung zu ermöglichen, müssen größere tantalreiche Leiterplatten beim Erstbehandler aussortiert werden. Die Identifizierung von Leiterplatten, die viele Tantalcondensatoren enthalten, ist mit geschultem Auge mit einiger Sicherheit möglich. Diese Tantal-reichen Leiterplatten wären einer oder mehreren Anlagen zur Entstückung und Abtrennung von Tantalcondensatoren zuzuführen. Zur Rückgewinnung des Tantals aus den separierten Condensatoren stehen geeignete Verfahren zur Verfügung. Die Betreiber dieser Prozesse zahlen für saubere Tantalcondensatoren je nach aktuellem Tantalpreis schon heute eine Vergütung.

2.4.9.3 Mengengerüst und logistische Analyse der Abfallströme

Die Recycling-Kette beginnt mit der Rücknahme der Elektroaltgeräte. Diese können bei kommunalen Sammelstellen, Herstellern und dem Handel zurückgegeben werden. Der Prozess der Rücknahme ist bereits etabliert. Die Elektroaltgeräte gehen im weiteren Verlauf an einen Demontagebetrieb. Dort müssen größere Leiterplatten ausgebaut werden.

Tantalreiche Leiterplatten wären hier auszusortieren und einer Anlage zur Separation der Kondensatoren bei einem Elektroaltgeräteaufbereiter zuzuführen. Für separierte Tantalkondensatoren besteht je nach aktuellem Tantalpreis bereits ein Markt.

Tabelle 65: Mengengerüst Tantalkondensatoren (Annahme: 48 Bearbeitungswochen pro Jahr); sämtliche Wertangaben basieren auf Neuwarenwerten des Mengenpotenzials des Zielmetalls (Tantal)

Parameter	Wert
Aufkommen / Jahr	30t Tantal in Kondensatoren
Wertpotenzial / Jahr	Wert pro kg Tantal: 176 € Gesamt: 5,28 Mio. € Tendenz zukünftige Mengen: gleichbleibend (Anzahl Tantalkondensatoren steigend, aber Gesamtmenge durch Miniaturisierung gleichbleibend) Hinweis: nur ein Teil des Potenzials steht tatsächlich zur Verfügung (unvollständige Erfassung der Abfälle, Separation nicht immer möglich, Materialverluste entlang der Verwertungskette)
Durchschnittliches Aufkommen pro Demontagebetrieb	(Annahme: 439 Demontagebetriebe (Quelle ear-Portal 2018)) 68 kg Tantal / Jahr 1,4 kg Tantal / Woche
Durchschnittliches Wertpotenzial pro Demontagebetrieb	11.968 € Umsatz / Jahr 285 € Umsatz / Woche Neuwarenwert angenommen als maximaler Umsatz pro Jahr; tatsächlicher Wert wesentlich kleiner (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Kosten / Arbeitsstunde	28,10 € (Statistisches Bundesamt (2015))
Finanzierbare Arbeitszeit	10 Stunden pro Woche (Grenzfallbetrachtung – tatsächlich muss aus dem Materialwert die gesamte Verwertungskette finanziert werden!)
Mengen- und Wertpotenzial	Menge Tantal pro Kondensator ca. 0,03 bis 0,09 g (eigene Analyseergebnisse) Wert pro Kondensator ca. 0,01 bis 0,02 €

2.4.9.4 Bündelungskonzept

Grundsätzlich wäre eine Bündelung über Einbindung sämtlicher Erstbehandler möglich. Hierzu müssten diese aber hochwertige Leiterplatten aus der Hand geben, die sie schon heute gewinnbringend verkaufen. Der Anteil des Tantals am Gesamtwert ist dabei recht klein, bietet hierzu also kaum hinreichende Motivation. Zudem wäre ein nicht unerheblicher Sortieraufwand erforderlich, der von möglichen Abnehmern der Leiterplatten kaum angemessen vergütet werden könnte.

Eine Sortierung der Leiterplatten sollte daher von Unternehmen durchgeführt werden, die ggfs. Anlagen zur Separation der Tantalkondensatoren betreiben. Beispielsweise wurde bei der Electroycling

GmbH in Goslar im Auftrag der Deutschen Telekom eine Versuchsanlage aufgebaut und mit gutem Erfolg eine Technik erprobt, mit der künftig Tantalkondensatoren von Leiterplatten aus dem Rückbau obsoleter Vermittlungstechnik separiert werden können (bifa 2018).

Dieser Ansatz – und möglicherweise auch andere – bieten Aussichten auf relativ einfach zugängliche, große Mengen tantalreicher Leiterplatten und könnten, wenn entsprechende Anlagen einmal in Betrieb sind, weitere Mengen aus mit Blick auf die Zielmetalle interessanten Marktsegmenten anziehen.

2.4.9.5 Maßnahmenoptionen

Zu diesem Abfallstrom werden keine Maßnahmen vorgeschlagen.

3 Zwischenlagerung bis Recyclingtechnik verfügbar ist

Für die Rückgewinnung von Sondermetallen wie Neodym oder Indium aus Post-Consumer-Abfällen stehen derzeit in Deutschland keine ausreichenden großtechnischen Recyclingkapazitäten zur Verfügung. Neben der Entwicklung geeigneter Verwertungstechniken ist eine wichtige Voraussetzung für Investitionen in eine industrielle Recyclinganlage die Generierung relevanter Mengen an sondermetallhaltigen Abfällen. Ein denkbarer Ansatz zur Schaffung der erforderlichen Mengenströme und zur Überbrückung der Zeit, bis die Anlagenkapazität zur Verfügung steht, ist die Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Abfallströme.

3.1 Auswahl geeigneter Sondermetalle und Abfallströme

In Kapitel 2.1 wurden zunächst folgende Abfallströme für die Analyse einer möglichen Zwischenlagerung vorausgewählt.

Tabelle 66: Zur Analyse der Zweckmäßigkeit einer möglichen Zwischenlagerung vorausgewählte Abfälle

Abfallströme
Indiumhaltige Abfälle (In)
<ul style="list-style-type: none"> • LCD-Display-Schichten
Cer und lanthanhaltige Abfälle (Ce, La)
<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel (optische Industrie) • FCC-Katalysatoren • Autokatalysatoren (Schlacken aus der Aufbereitung) • NiMH-Batterien (Schlacken aus der Aufbereitung) • Spezialgläser / Keramiken
Leuchtstoffe (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)
<ul style="list-style-type: none"> • aus Leuchtstofflampen • aus CRT-Geräten • aus LCD
NdFeB-Magnete (v.a. Nd, Dy, Pr)
<ul style="list-style-type: none"> • aus Festplatten Kopfhörern, Lautsprechern • aus Motoren von Elektrofahrrädern • aus Nabendynamos von Fahrrädern • aus Antriebsmotoren von Elektrofahrzeugen • aus kleinen E-Motoren aus Pkw • aus Industriemotoren • aus Windenergieanlagen • aus Raumklimaanlagen • aus medizinischen Geräten (z.B. MRT)

Diese Abfallströme werden mit Blick auf eine mögliche Langzeitzwischenlagerung mit Hilfe folgender Kriterien bewertet.

Kritikalität

Die Bewertung der Kritikalität der Versorgung einer Volkswirtschaft mit einem Rohstoff erfolgt in der Regel über die Dimensionen Versorgungsrisiko und ökonomische Bedeutung. Der aktuelle Report on critical raw materials for the EU bewertet das Versorgungsrisiko für schwere Seltenerdmetalle (von

den hier interessierenden nur Y und Dy) als sehr hoch, dasjenige für leichte Seltenerdmetalle (von den hier interessierenden La, Ce, Pr, Nd, Eu) als mittel. Indium liegt eher im unteren Mittelfeld der untersuchten Rohstoffe, wird also im Vergleich zu den Seltenerdmetallen als weniger kritisch bewertet. Hinsichtlich ihrer ökonomischen Bedeutung unterscheiden sich die hier relevanten Metalle nicht wesentlich (European Commission 2014; S. 24, Abb. 5). Mit Blick auf das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung kann daraus folgende qualitative Bewertung abgeleitet werden (1 = sehr gering, 5 = sehr hoch):

Indium

- A: Versorgungsrisiko: 2
- B: Wirtschaftliche Bedeutung für Europa: 3

Zusammenführung der Dimensionen zu einer Kennzahl: $A*B = 6$

Cer, Lanthan, Neodym, Praseodym, Europium

- A: Versorgungsrisiko: 4
- B: Wirtschaftliche Bedeutung für Europa: 3

Zusammenführung der Dimensionen zu einer Kennzahl: $A*B = 12$

Yttrium, Dysprosium

- A: Versorgungsrisiko: 5
- B: Wirtschaftliche Bedeutung für Europa: 3

Zusammenführung der Dimensionen zu einer Kennzahl: $A*B = 15$

Die Zusammensetzungen von Abfällen, z.B. von NdFeB-Magneten, unterscheiden sich erheblich, und zwar auch innerhalb einzelner Anwendungsgruppen. Eine differenzierte Bewertung zu unterschiedlichen Einsatzbereichen und den hierfür typischen Zusammensetzungen hinsichtlich ihres Versorgungsrisikos und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung ist somit nur näherungsweise möglich.

Treibhauseffekt

Das Umweltentlastungspotenzial ergibt sich aus den in den Abfällen enthaltenen Mengen der Zielmetalle sowie den Umweltbelastungen durch Gewinnung der Metalle aus Primärrohstoffen. Als Leitparameter zur Abschätzung der Umwelteffekte wird hier der Treibhauseffekt herangezogen.

Tabelle 67 zeigt die Ergebnisse der Bewertung der zu betrachtenden Abfallströme.

Tabelle 67: Vorausgewählte Abfallströme und ihre Bewertung; Potenzial ohne Berücksichtigung von Verlusten bei Erfassung und Aufbereitung und ohne Berücksichtigung des Verwertungsaufwands; Kritikalität von Magnetanwendungen mit typischen Dysprosiumgehalten von ca. 10 % wird mit 13 bewertet, alle übrigen mit 12; Leuchtstoffe werden wegen des hohen Dysprosiumgehaltes mit 14 bewertet. Metallgehalte <5% in Klammern; n.b. = nicht bekannt

Abfallstrom	Kritikalität Zielmetalle	Potenzial Zielmetalle (Abfallstrom) Deutschland A (t)	Carbon Footprint B (t CO ₂ eq/t Zielmetalle)	Carbon Footprint Zielmetalle im Ab- fallstrom A*B (t CO ₂ eq)
Indium				
LCD-Display-Schichten (In)	6	6* (138)**	225	1.350
Cer/Lanthan				
Poliermittel (optische Industrie) (Ce, La) (Trockenmasse)	12	93 (400)	6,6	612
FCC-Katalysatoren ((La))	12	250 (9400)	15,7	3,940
NiMH-Batterien (Schlacken aus der Aufbereitung) (Ce, La)	12	172 (n.b.)	16,1	2.760
Autokatalysatoren (Schlacken aus der Aufbereitung) ((Ce), (La))	12	128 (3000)	7,2	919
Spezialgläser / Keramiken ((Ce))	12	n.b.	7,4	n.b.
Seltenerdmetalle aus Leuchtstoffen				
Leuchtstoffe aus Leuchtstofflam- pen (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	14	20 (130)	20,3	405
Leuchtstoffe aus CRT-Geräten (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	14	3,75 (15)	15,2	56,9
Leuchtstoffe aus LCD (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	14	0,4 (4)	20,3	8,1
Seltenerdmetalle aus NdFeB- Magneten				
NdFeB-Magnete aus Festplatten, Kopfhörern, Lautsprechern (Nd, (Pr), (Dy))	12	82,5 (275)	27,9	2.300

NdFeB-Magnete aus Industriemotoren (Nd, Dy)	13	18 (60)	38,0	684
NdFeB-Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern (Nd, Pr, (Dy))	12	7,2 (24)	29,1	209
NdFeB-Magnete aus Windenergieanlagen (Nd, (Dy), (Pr))	12	3,3 (11)	32	106
NdFeB-Magnete aus Raumklimaanlagen (Nd, Dy, (Pr))	12	2,7 (9)	29,3	79
NdFeB-Magnete aus Antriebsmotoren von E-Fahrzeugen (Nd, Dy)	13	3 (10)	34,9	105
NdFeB-Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw (Nd, (Dy), (Pr))	12	20,1 (67)	30	604
NdFeB-Magnete aus medizinischen Geräten (z.B. MRT) (Nd, (Dy), (Pr))	12	3 (10)	31,1	93
NdFeB-Magnete aus Nabendynamos von Fahrrädern (Nd, Dy)	13	1,5 (5)	36,9	55

Quelle Carbon Footprint Einzelmetalle: ecoinvent 2017; PloS 2014

* Jahresverbrauch an Indium für LCD-Displays 130 t; Annahme: anfallendes Potenzial entspricht dem Anteil des Bruttoinlandsprodukts (Deutschland 4,5 % des Welt-BIP)

** Annahme: 10% der LCD-Masse (1380 t)

Bis auf die indiumhaltigen Abfälle unterscheiden sich die Kritikalitäten nur wenig. Die Abschätzung des ökologischen Potenzials anhand des Leitparameters Carbon-Footprint weist hingegen erhebliche Unterschiede auf. Beim Carbon-Footprint der Gesamtmengen zu den jeweiligen Abfallgruppen stehen folgende Abfallströme deutlich im Vordergrund:

Die Gruppe Cer/Lanthan wird dominiert von FCC-Katalysatoren und Schlacken aus der Aufbereitung von NiMH-Batterien. Ob angesichts der geringen Konzentration der Metalle in den FCC-Katalysatoren eine Rückgewinnung mit angemessenem Aufwand möglich ist, ist allerdings zu bezweifeln.

Die Gruppe Seltenerdmetalle aus Leuchtstoffen fällt insgesamt weit hinter die übrigen Gruppen zurück. Sie wird klar dominiert von Leuchtstoffen aus Leuchtstofflampen.

Bei der Gruppe NdFeB-Magnete haben drei Abfallströme die mit Abstand größte Bedeutung: Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher, Industriemotoren sowie kleinen E-Motoren aus Kraftfahrzeugen.

Der einzige Abfallstrom zur Gruppe Indium sind LCD-Display-Schichten.

Die Relevanz der Zielmetalle für die Umwelttechnik und die erwartete Entwicklung der Nachfrage stellt sich derzeit folgendermaßen dar:

Indium (Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 256 ff.)

- Relevanz für Umwelttechnik
 - Einsatz in Dünnschicht-Photovoltaik (weltweit ca. 8% des Bedarfs).
 - Dünnschicht-Photovoltaik ist eine Wachstumstechnologie. Aufgrund der erwarteten Materialeffizienzsteigerung wird der Indiumbedarf in diesem Feld voraussichtlich dennoch abnehmen (von 103 t in 2013 auf 87 t in 2035).

Bewertung: gering

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage
 - Indium-Bedarf steigend, getrieben vor allem durch starkes Wachstum im Haupteinsatzbereich Flachbildschirme. Bis 2025 wird in diesem Bereich mit einer Verdopplung der jährlichen Einsatzmenge gerechnet.

Bewertung: steigend

Cer

- Relevanz für Umwelttechnik
 - Brennstoffzellen (mengenmäßig derzeit unbedeutend)
 - Autokatalysatoren

Bewertung: gering

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage
 - Wichtigste Einsatzbereiche sind Poliermittel (36 % des Gesamtverbrauchs) Metallurgie (19%) und Autokatalysatoren (13%) (European Commission 2014; S. 162).
 - Es wird erwartet, dass der Bedarf an Cer bis 2020 jährlich um 5,6% wächst (European Commission 2014; S. 163).
 - Da Cer in großen Anteilen als Nebenprodukt der Gewinnung anderer Seltenerdmetalle gewonnen wird, ist mit Knappheit auch künftig nicht zu rechnen.

Bewertung: steigend

Lanthan

- Relevanz für Umwelttechnik
 - Brennstoffzellen (mengenmäßig derzeit unbedeutend)
 - Autokatalysatoren (mengenmäßig unbedeutend)

Bewertung: gering

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage
 - Wichtigste Einsatzbereiche sind FCC-Katalysatoren (44 % des Gesamtverbrauchs) und Batterien (26 %) (European Commission 2014; S. 154).
 - Es wird erwartet, dass der Bedarf an Lanthan bis 2020 jährlich um 5,5% wächst (European Commission 2014; S. 161).

Bewertung: steigend

Neodym

- Relevanz für Umwelttechnik (Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 230)
 - Windkraftanlagen
 - Elektrische Antriebsmotoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge
 - Antriebsmotoren für Elektrofahrräder

Bewertung: hoch

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage

- Wichtigster Einsatzbereich sind Permanentmagnete (88 % des Welt-Jahresbedarfs) (European Commission 2014; S. 154). Bis 2035 wird eine Verdopplung dieses Bedarfs erwartet (Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 276).

Bewertung: stark steigend

Praseodym, Dysprosium

- Relevanz für Umwelttechnik
 - Windkraftanlagen
 - Elektrische Antriebsmotoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge
 - Antriebsmotoren für Elektrofahrräder

Bewertung: hoch

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage
 - Wichtigster Einsatzbereich sind Permanentmagnete (Dysprosium nahezu 100 % des Welt-Jahresbedarfs, Praseodym ca. 73 %) (European Commission 2014; S. 154). Bis 2035 wird eine Verdopplung des Bedarfs erwartet (Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 276).

Bewertung: stark steigend

Yttrium, Europium

- Relevanz für Umwelttechnik
 - Wesentliche Anwendungen nicht bekannt

Bewertung: gering

- Erwartete Entwicklung der Nachfrage
 - Wichtigster Einsatzbereich sind Leuchtstoffe (Yttrium 78 % des Welt-Jahresbedarfs, Europium ca. 96 %) (European Commission 2014; S. 154). In diesem Einsatzbereich ist von abnehmendem Bedarf auszugehen.

Bewertung: sinkend

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Faktoren wie künftige technische Innovationen, Marktentwicklungen und Ausweichreaktionen von Marktteilnehmern bei Preisveränderungen aus heutiger Sicht nur begrenzt einschätzbar sind, aber sowohl auf die Relevanz für Umwelttechnik als auch auf die Nachfrageentwicklung erheblichen Einfluss haben können.

Für eine fundierte Prognose der längerfristigen Bedarfsentwicklung und damit des Aufkommens fehlen vielfach belastbare Grundlagen. An dieser Stelle ist daher nur eine orientierende Abschätzung möglich.

Tabelle 68 zeigt für die betrachteten Abfallströme das derzeitige Mengenpotenzial und eine Abschätzung der zu erwartenden Entwicklung.

Tabelle 68: in Kapitel 2.1 vorausgewählte Abfallströme mit Zielmetallen. Metallgehalte <5% in Klammern; n.b. = nicht bekannt.

Abfallstrom	Potenzial Abfallstrom Deutschland (t)	Erwartete Entwicklung Abfallmenge	Annahme Potenzial 2027 (t)
Indium			
LCD-Display-Schichten (In)	138	Steigend (Annahme: Faktor 2)	276
Cer/Lanthan			
Poliermittel (optische Industrie) (Ce, La)	400	Gleichbleibend	400
FCC-Katalysatoren (La)	9.400	Gleichbleibend	9.400
NiMH-Batterien (Schlacken aus der Aufbereitung) (Ce, La)	n.b.	Gleichbleibend	n.b.
Autokatalysatoren (Schlacken aus der Aufbereitung) ((Ce), (La))	3.000	Gleichbleibend	3.000
Spezialgläser / Keramiken (Ce)	n.b.	Gleichbleibend	n.b.
Seltenerdmetalle aus Leuchtstoffen			
Leuchtstoffe aus Leuchtstofflampen (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	130	Sinkend (Annahme: Faktor 0,8)	104
Leuchtstoffe aus CRT-Geräten (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	15	Stark sinkend (Annahme: Faktor 0,3)	4,5
Leuchtstoffe aus LCD (Y, Pr, Eu, Ce u.a.)	4	Sinkend (Annahme: Faktor 0,8)	3,2
Seltenerdmetalle aus NdFeB-Magneten			
NdFeB-Magnete aus Festplatten, Kopfhörern, Lautsprechern (Nd, (Pr), (Dy))	275	Sinkend (Annahme: Faktor 0,8)	220
NdFeB-Magnete aus Industriemotoren (Nd, Dy)	60	Steigend (Annahme: Faktor 2)	120
NdFeB-Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern (Nd, Pr, (Dy))	24	Stark steigend (Annahme:	240

NdFeB-Magnete aus Windenergieanlagen (Nd, (Dy), (Pr))	12	Faktor 10) Steigend (Annahme: Faktor 2)	22
NdFeB-Magnete aus Raumklimaanlagen (Nd, Dy, (Pr))	9	Stark steigend (Annahme: Faktor 10)	90
NdFeB-Magnete aus Antriebsmotoren von E-Fahrzeugen (Nd, Dy)	10	Stark steigend (Annahme: Faktor 10)	100
NdFeB-Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw (Nd, (Dy), (Pr))	67	Stark steigend (Annahme: Faktor 10)	670
NdFeB-Magnete aus medizinischen Geräten (z.B. MRT) (Nd, (Dy), (Pr))	10	Gleichbleibend	10
NdFeB-Magnete aus Nabendynamos von Fahrrädern (Nd, Dy)	5	Steigend (Annahme: Faktor 2)	10

Bei den Mengenangaben handelt es sich um Mengenpotenziale. Die tatsächlich in Deutschland anfallenden, hier erfassten und gegebenenfalls nach geeigneter Vorbehandlung zwischenzulagernden Mengen werden deutlich geringer sein.

Gleichwohl bietet diese Abschätzung eine Basis zur Auswahl der Abfallströme für die weitere Analyse. Diese stellt sich differenziert nach enthaltenen Zielmetallen und Abfallgruppen folgendermaßen dar:

- Indium
 - Diese Gruppe weist aufgrund des relativ hohen spezifischen Carbon Footprint-Wertes trotz der eher geringen Menge ein vergleichsweise hohes mit dem Leitparameter Carbon Footprint angenähertes Umweltentlastungspotenzial auf.
 - Die Indium-Einsatzmengen in diesem Bereich werden sich bis 2035 voraussichtlich etwa verdoppeln (Marscheider-Weidemann et al. 2016; S. 258).
- Cer/Lanthan
 - Das Mengenpotenzial und das Umweltentlastungspotenzial entfallen zum weitaus größten Teil auf FCC-Katalysatoren und Schlacken aus der Aufbereitung von NiMH-Batterien. Ob angesichts der geringen Konzentration der Metalle in den FCC-Katalysatoren eine Rückgewinnung mit angemessenem Aufwand möglich ist, ist allerdings zu bezweifeln.
 - Bei allen hier untersuchten Einsatzgebieten wird von auch künftig weitgehend unveränderten Einsatzmengen ausgegangen.
 - Eine Zwischenlagerung von Spezialgläsern und Keramiken erscheint aufgrund der geringen Mengen und Konzentrationen nicht zweckmäßig. Gleiches gilt für FCC-Katalysatoren, die zwar eine große Masse an Cer enthalten, allerdings nur in geringen Konzentrationen. Schlacken aus der Aufbereitung von NiMH-Batterien und Autokatalysatoren weisen höhere Konzentrationen an Zielmetallen auf. Allerdings ist der künftige

Aufbau eines Rückgewinnungsprozesses angesichts des geringen Materialwertes von Cer und Lanthan sowie der absehbar stabilen Preislage nicht zu erwarten. Auch diese Abfälle werden daher für eine Zwischenlagerung nicht empfohlen. Einzig für Poliermittel soll die Zwischenlagerung geprüft werden. Zwar greift auch hier das Argument des geringen Wertes der Zielmetalle, zudem sind die Gesamtmengen recht klein; aufgrund der hohen Zielmetallkonzentrationen besteht hier allerdings die Option einer kostengünstigen Verwertung durch Einsatz in Keramikindustrie und Gießereien.

- Seltenerdmetalle aus Leuchtstoffen
 - Das Umweltentlastungspotenzial dieser Gruppe ist aufgrund der wesentlich geringeren Menge etwa eine Größenordnung kleiner als das der übrigen Gruppen. Den größten Beitrag leisten Leuchtstofflampen.
 - Bei allen Gruppen ist von künftig sinkenden Einsatzmengen auszugehen.
 - Leuchtstoffe können unabhängig von ihrer Herkunft unter gleichen Bedingungen eingelagert werden, sofern die Abfälle nach Quellen nachvollziehbar getrennt gehalten werden, um einem späteren Verwerter ein gezielteres Vorgehen zu ermöglichen.
- Seltenerdmetalle aus NdFeB-Magneten
 - Das Mengenpotenzial und das Umweltentlastungspotenzial im Abfall werden derzeit deutlich dominiert IT-Produkten (Festplatten, Kopfhörern und Lautsprechern) sowie Fahrzeug- und Industriemotoren.
 - Bis 2027 kann etwa mit einer Verdreifachung der Gesamt-Einsatzmenge an NdFeB-Magneten gerechnet werden..
 - Magnete können unabhängig von ihrer Herkunft unter gleichen Bedingungen eingelagert werden, sofern kein Absatzmarkt besteht (wie z.B. bei großen Magneten wie aus Windkraftanlagen anzunehmen) und die Abfälle nach Quellen nachvollziehbar getrennt gehalten werden, um einem späteren Verwerter ein gezielteres Vorgehen zu ermöglichen, falls dies sich als zweckmäßig erweist.

Mengentreiber und damit prozessbestimmend sind innerhalb der für eine Zwischenlagerung zu prüfenden Zielmetallgruppen jeweils die heutigen Hauptmengen, die aller Voraussicht nach auch in den nächsten zehn Jahren die Gesamtmengen wesentlich bestimmen werden.

3.2 Recyclingverfahren

3.2.1 Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete

Je nach Anwendungsgebiet unterscheiden sich NdFeB-Magnete nach Anwendungsdauer, Zusammensetzung und Gewicht. Das Gewicht liegt unter einem Gramm bei kleinen Elektronikgeräten und kann pro Anlage 1.000-2.000 kg in Generatoren von Windturbinen betragen. Der Anteil an Seltenerdmetallen beträgt meist ca. 31-32 %. Der Großteil davon sind Neodym und Praseodym. In geringeren Mengen sind je nach Anwendung Dysprosium, Terbium und Gadolinium enthalten. Es wurden in den letzten Jahren einige Verfahren zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle aus End-of-Life-Geräten entwickelt. Die meisten dieser Verfahren befinden sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung.

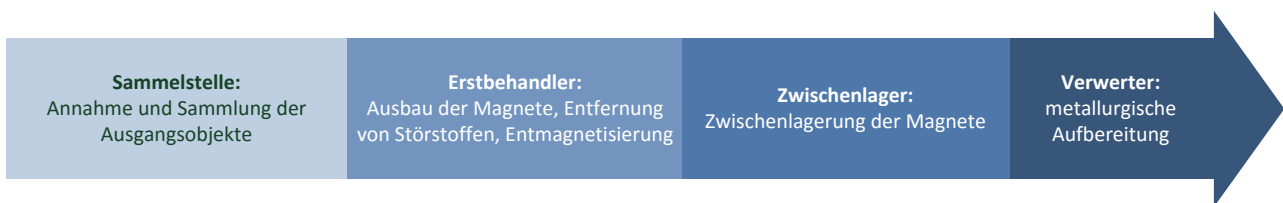
Es gibt unterschiedliche metallurgische Verfahren zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle aus Magneten. Meist wurden sie entwickelt, um Seltenerdmetalle aus homogenen, störstoffarmen Produktionsresten zurückzugewinnen. Problematisch beim Recycling von NdFeB-Magneten aus post-user-Abfällen sind die höheren Fremdstoffanteile und die inhomogene Zusammensetzung.

Außer Generatoren und Motoren aus Windturbinen oder Elektrofahrzeugen werden Permanentmagnete derzeit nicht vordemontiert (Yang Y. et al. 2016; S. 122-149). Aus Elektroaltgeräten werden

NdFeB-Magnete wegen der geringen Größen in der Regel nicht separiert. Die Geräte oder ihre Komponenten werden nach der Entfernung von Schadstoffen komplett geschreddert. Aufgrund der magnetischen Eigenschaften finden sich die Magnete nach den mechanischen Trennverfahren in der FE-Fraktion. Eine Rückgewinnung der Seltenerdmetalle aus dem geschredderten Material ist aufgrund der geringen Konzentration nicht zweckmäßig. In der Regel wird daher die Abtrennung und separate Behandlung der Magnete angestrebt.

Die Abtrennung der Magnete gestaltet sich jedoch aus verschiedenen Gründen schwierig. Sie sind oft fest mit dem Bauteil verklebt und die Komponenten des Geräts schwer trennbar. Darüber hinaus weisen die Magnete oft eine Ni- oder Ni-Cu-Ni-Beschichtung auf, die sich störend auf den Recyclingprozess auswirken kann. Zudem ist eine Entmagnetisierung der Magnete erforderlich. Abbildung 22 zeigt einen möglichen Ablauf des Recyclingprozesses.

Abbildung 22: Ablauf des Recyclingprozesses



3.2.1.1 Abtrennung der NdFeB-Magnete aus dem Abfallstrom

Die Abtrennung der Magnete aus Geräten kann manuell erfolgen. Insbesondere bei kleineren Magneten ist dies sehr arbeits- und damit kostenintensiv. Speziell für Magnete aus Komponenten von Elektroaltgeräten wurde das HPMS-(Hydrogen Processing of Magnet Scrap) Verfahren entwickelt (Yang Y. et al. 2016; S. 122-149). Dabei wird das ausgebaute magnethaltige Bauteil mit Wasserstoff bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur behandelt. Gesinterte Magnete reagieren mit dem Wasserstoff, was zu einer Erhöhung des Volumens um ca. 5 % führt. Die spröden Magnete zerbrechen dadurch und es liegt ein brüchiges hydriertes Pulver vor. Eventuell vorhandene Nickelbeschichtungen blättern ab. Die Koerzitivfeldstärke des Pulvers ist dabei so gering, dass das Material prinzipiell weichmagnetisch ist und nicht mehr an anderen eisenhaltigen Komponenten anhaftet. Anschließend kann das Pulver mit einem Trommelsieb abgetrennt werden. Nickelverunreinigungen werden über einen weiteren Siebschritt größtenteils entfernt. Bei Versuchen wurden dabei Nickelkonzentrationen von unter 400 ppm erreicht. Dies entspricht dem Nickelgehalt der Magnetlegierung. Das Pulver kann direkt wieder eingesetzt werden, um neue Magnete zu produzieren oder Prozessen zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen zugeführt werden.

Ein anderer, für Magnete aus Festplatten entwickelter Prozess setzt auf Entmagnetisierung und anschließenden Hydrierung der FE-Fraktion aus der Festplattenzerkleinerung (Völker, Weckerle 2015; S. 6).

Eine weitere Möglichkeit ist die mechanische Abtrennung der Magnete mit einer Kombination von Vibration, Entmagnetisierung und manueller Sortierung (Tsamis, Coyne 2015; S. 21). Festplatten können dabei direkt in eine sich drehende Trommel gegeben werden. Durch die Vibration und den Aufprall an den Wänden lösen sich die Schrauben der Festplattenhülle und die Magnete können abgetrennt werden (Yang et al. 2016; S. 122-149). Bei größeren Ausgangsobjekten (z. B. Raumklimaanlagen) müssen die magnethaltigen Bauteile (z. B. Rotoren) vorher manuell abgetrennt werden.

Ein weiteres Verfahren wurde von der TU Delft für ausgebaute Festplatten entwickelt: Aus den zerkleinerten Festplatten wird mit einem Stahlsieb eine mit Magnetmaterial angereicherte Fraktion abgetrennt, die anschließend thermisch entmagnetisiert, gemahlen und klassiert wird. Auf diese Weise

können die Seltenerdmetalle für die hydrometallurgische Aufbereitung aufkonzentriert werden. (Yang et al. 2016; S. 122-149).

Apple hat eine Robotikanlage entwickelt, um neben anderen Materialien auch NdFeB-Magnete aus iPhones zurückzugewinnen (EUWID 19/2018, S. 40).

3.2.1.2 Verwertungsverfahren

Nach dem Abtrennen der Magnete oder magnethaltigen Fraktionen stehen verschiedene Verwertungsverfahren zur Verfügung.

Sauberer nicht oxidiertes Magnetschrott (z. B. das hydrierte Pulver des HPMS-Verfahren) kann direkt wieder zur **Erzeugung einer Magnetlegierung** eingesetzt werden (Binnemans et. al. 2013; S. 7). Material aus Schredderprozessen ist aufgrund des höheren Störstoffanteils dafür nicht geeignet. Die Methoden zur Herstellung der Legierung sind prinzipiell die gleichen wie bei der Ersterstellung:

- Erneutes Sintern
- Schmelzspinnverfahren
- HDDR (Hydrogenation, Disproportionation, Desorption and Recombination)
- Gießen

Es sind jedoch einige Anpassungen aufgrund abweichender Eigenschaften des Recyclingmaterials erforderlich. Vor allem der höhere Sauerstoffgehalt muss kompensiert werden. Darüber hinaus können durch die variierende Zusammensetzung Performanceschwankungen auftreten. Die ökologischen Auswirkungen sind jedoch deutlich geringer als bei anderen Verfahren. Die Firma Ohnmacht & Baumgärtner GmbH & Co. KG recycelt bereits Festplattenmagnete zu Magneten, die auf 95 % der Feldstärke-Kennwerte von Neumaterial kommen. Sämtliche Schritte der Aufbereitung finden unter Schutzgasatmosphäre statt um die magnetischen Eigenschaften zu erhalten. Dazu gehören folgende Verfahrensschritte: Formgebung in einer Metallpulver-Spritzgussmaschine, Entbindern und Sintern (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2017).

Zur Erzeugung von Seltenerdmetallkonzentraten aus Magnetschrott sind metallurgische Prozesse erforderlich, die sich untergliedern in hydro- und pyrometallurgische Verfahren.

Hydrometallurgische Verfahren (Quelle: Yang et al. 2016; S. 122-149).

Zentrale Schritte hydrometallurgischer Verfahren sind die Laugung der Magnete oder des Magnetschrotts, die Abtrennung von Nicht- Seltenerdmetallen und die Auftrennung in die unterschiedlichen Seltenerdmetalle mittels Solventextraktion, Ionenaustauschverfahren oder ionischen Flüssigkeiten. Anspruchsvoll gestalten sich dabei vor allem die selektiven Lösungsschritte, Aufkonzentrierung und Trennung der Seltenerdmetalle.

Die Laugung der Magnete oder des Magnetschrotts kann auf drei Wegen erfolgen:

- Komplette Auflösung der Magnete (mit oder ohne vorhergehende Röstung)
- Rösten und selektive Laugung der Seltenerdmetalle
- Umwandlung der Seltenerdmetalle direkt in eine neue Feststoff-Phase

Problematisch für die Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Abfallströmen im Vergleich zur Gewinnung aus Erzen sind enthaltene Elementen, die in Seltenerdmetall-haltigen Erzen nicht vorkommen.

Solvent-Extraktionsverfahren basieren auf der Bildung von Komplexen zwischen in organischen Lösungsmitteln löslichen Liganden und Ionen in einer wässrigen Phase und dem Transfer dieser Komplexe in eine organische Phase. Die Effektivität des Solventextraktionsprozesses hängt von einer Vielzahl an

Faktoren ab. Unter anderem spielen die chemischen Eigenschaften der Ionen, die Eigenschaften der Liganden, die Eigenschaften der Lösemittel, der pH-Wert der wässrigen Phasen und die Temperatur eine Rolle. Schwierigkeiten beim Trennen der Seltenerdmetalle verursachen deren sehr ähnliche chemische Eigenschaften. Als Liganden für die Trennung von Seltenerdmetallen werden meist phosphororganische Verbindungen (z. B. D2EHPA) verwendet. Da die Ligandenverbindungen nicht unbegrenzt recycelt werden können, wurden Liganden entwickelt, die das CHON-Prinzip einhalten. Diese Liganden enthalten nur Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff und haben gegenüber Phosphor- oder Schwefelverbindungen den Vorteil, dass sie aschefrei verbrannt werden können.

Ionische Flüssigkeiten können die organische Phase in Solventextraktionsprozessen ersetzen. Aufgrund der hohen Konzentration an Extraktionsmittel in unverdünnten ionischen Flüssigkeiten können deutlich geringere Mengen an Lösemittel verwendet werden.

Pyrometallurgische Verfahren (Quelle: Yang et al. 2016; S. 122-149).

Pyrometallurgische Verfahren, d. h. Hochtemperaturverfahren dienen in erster Linie der selektiven Überführung der Seltenerdmetalle in eine andere Phase. Dadurch werden die Seltenerdmetalle aufkonzentriert und können mittels Schmelzflusselektrolyse oder metallothermischer Reduktion gewonnen werden. Sind die Konzentrationen an Seltenerdmetallen im Verfahrensinput nicht sehr hoch, dann müssen allerdings weitere, hydrometallurgische Schritte nachgeschaltet werden. Alle pyrometallurgischen Verfahren sind noch im Stadium der Forschung. Folgende Verfahren zur Behandlung von Seltenerdmetall-haltigen Magneten sind bekannt:

- Rösten
- Schmelzaufbereitung
- Elektrochemische Aufbereitung

Gas-Phasen-Extraktion (Umwandlung der Metalle in flüchtige Chloride und Trennung in unterschiedlichen Temperaturzonen)Tabelle 69 gibt einen Überblick über die Verfahren zum Recycling von NdFeB-Magneten und ihre Vor- und Nachteile.

Tabelle 69: Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete und ihre Vor- und Nachteile

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Direkte Wiederverwendung der Magnete	<ul style="list-style-type: none"> • Große, einfach auszubauende Magnete (z. B. aus Windrädern, großen Elektromotoren und Generatoren in Hybrid- und Elektrofahrzeugen) • Nur bei unbeschädigten korrosions- und störstofffreien Magneten 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökologisch bester Recyclingweg • Geringer Energieaufwand • Kein Chemikalieneinsatz • Kein Anfall von Abfällen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur für wenige Magnete geeignet • Nur geringe Mengen der geeigneten Magnete fallen an
Rückgewinnung der Magnetlegierung	<ul style="list-style-type: none"> • Saubere nicht oxidierte Magnete • Gesinterte Magnete • Geringe Variation 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltschonender als die Rückgewinnung der einzelnen Metalle • Geringer Energie- 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechtere Qualität als neuwertige Magnete (höherer Sauerstoffanteil) • Evtl. Performance-

	in der Zusammen- setzung	verbrauch	Schwankungen aufgrund variie- render Zusammen- setzung
Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Für alle Magnetzu- sammensetzung anwendbar • Anwendbar für oxidierte und nicht-oxidierte Le- gierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Chemika- lienverbrauch • Kaum Anfall von Abfällen • Geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Verfahrens- schritte • Verbrauch von großen Mengen an Chemikalien • Erzeugung von großen Mengen Abwasser
Pyrometallurgische Verfahren (flüssig)	<ul style="list-style-type: none"> • Prinzipiell auf alle Magnetzusam- mensetzungen anwendbar • Direktes Ein- schmelzen und Flüssigmetall- extraktion bei oxidierten Legierungen nicht möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Anfall von Abwasser • Weniger Verfah- rensschritte als bei hydrometallurgi- schen Verfahren • Direktes Ein- schmelzen zu „Masterlegierun- gen“ möglich • Gewinnung von metallischen Sel- tenerdmetallen durch Flüssigme- tallextraktion mög- lich 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energiever- brauch • Teilweise große Mengen fester Ab- fallströme
Pyrometallurgische Verfahren (gasförmig)	<ul style="list-style-type: none"> • Für alle Magnetzu- sammensetzungen anwendbar • Anwendbar für oxidierte und nicht-oxidierte Le- gierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Anfall von Abwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energiever- brauch • Verbrauch großer Mengen gasförmig- en Chlors • Korrosionsanfällig

3.2.2 Recyclingverfahren für cer-/lanthanhaltige Abfallströme

Sämtliche Recyclingverfahren zur Rückgewinnung von Cer und Lanthan aus Abfallströmen konzentrieren sich auf einzelne, definierte Abfallströme. Eine Zusammenführung von unterschiedlichen Abfallströmen in einem Prozess gestaltet sich aufgrund der Vielfalt der Einsatzgebiete und Stoffzusammensetzungen der Abfallströme schwierig. Prinzipiell können für alle Abfallströme hydrometallurgische Verfahren eingesetzt werden. Jedoch sind die verwendeten Chemikalien und Schritte des Prozesses immer genau auf den jeweiligen Abfallstrom angepasst und nicht ohne Weiteres auf andere Materialzusammensetzungen anwendbar. Die meisten Untersuchungen wurden an Poliermitteln und

NiMH-Batterien durchgeführt. Zu Katalysatoren und Spezialgläsern gibt es nur wenige Untersuchungen.

3.2.2.1 Poliermittel

Quelle: Borra et. al. 2017

Poliermittel enthalten zwischen 40 und 99 % Ceroxid. Nach dem Gebrauch enthalten sie zusätzlich Fremdmaterialien wie Silicium, Eisen, Aluminium, Zink oder Natrium. Die Konzentrationen der Elemente in gebrauchten Poliermitteln dabei abhängig von der Zusammensetzung des polierten Glases und den eingesetzten Additiven und Flockungsmitteln. Der Gehalt an Ceroxid im verbrauchten Poliermittel beträgt zwischen 8 und 80 %. Prinzipiell stehen zum Recycling von Poliermitteln physikalische Trennverfahren, hydrometallurgische Verfahren und pyrometallurgische Verfahren zur Verfügung.

Physikalische Trennverfahren sind nur als Vorstufe für weitere Aufbereitungsschritte geeignet, da die erreichte Reinheit derzeit noch unzureichend ist. Die Entfernung aller Siliciumdioxidpartikel bereitet aufgrund der sehr geringen Größe ($< 5\mu\text{m}$) Probleme. Eine Möglichkeit ist z. B. die Flotation mit Natriumlaurylsulfat. Jedoch liegen die erreichten Ausbeuten an Ceroxid nur bei ca. 40 %.

Hydrometallurgische Verfahren können unterschieden werden in Verfahren mit Laugen- und Verfahren mit Säureeinsatz. Verfahren mit Laugeneinsatz dienen der Entfernung von Verunreinigungen. Die Hauptverunreinigungen in Poliermitteln sind Aluminiumoxid und Siliziumdioxid. Beide können mit Natronlauge in Lösung gebracht werden. Die laugenbasierten Verfahren sind jedoch nur geeignet, um die Lebensdauer des Poliermittels erhöhen. In Laugen nicht lösliche Fremdstoffe reichern sich im Poliermittel an und bewirken eine Reduzierung der Poliermittelqualität nach mehreren Aufbereitungszyklen.

Cerioxid ist in nahezu allen Säuren schlecht löslich. Daher müssen konzentrierte Säuren bei erhöhten Temperaturen eingesetzt werden. Prinzipiell können verschiedene Säuren wie Salzsäure, Salpetersäure oder Schwefelsäure verwendet werden. Die vorhergehende Umwandlung von Cerverbindungen zu Cerdioxid mittels Rösten bei $600\text{ }^\circ\text{C}$ kann erhöht die Effektivität der Laugung. Jedoch steht der hohe Energieaufwand einer eher geringen Erhöhung der Ausbeute (ca. 10 %) gegenüber. Auch der Zusatz von Reduktionsmitteln kann die Löslichkeit von Cer und damit die Ausbeute verbessern.

Die Gewinnung von Cer aus der Lösung erfolgt über Fällung oder Solventextraktion. Zur Fällung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist die Fällung in Form von Oxalaten, die anschließend über Kalzinierung bei $650\text{ }^\circ\text{C}$ zu Oxiden umgewandelt werden. Ein weiterer Ansatz ist die Umwandlung des Cers zum Oxid mittels Wasserstoffperoxid und die anschließende Fällung des Lanthans als Oxalat.

Bei Einsatz **pyrometallurgischer Verfahren** werden die Seltenerdmetalle aus den Poliermitteln bei Temperaturen zwischen 450 und $950\text{ }^\circ\text{C}$ mit Al_2Cl_6 zu Chloriden umgesetzt und können anschließend von anderen Elementen abgetrennt werden. Die Trennung der Seltenerdmetalle voneinander ist aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften sehr aufwendig.

Grundsätzlich ebenfalls möglich ist der Einsatz des Poliermittels in der Keramikindustrie und in Gießereien.

Tabelle 70 gibt einen Überblick über die Verfahren zum Recycling von Poliermitteln und ihre Vor- und Nachteile.

Tabelle 70: Recyclingverfahren für Poliermittel

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Physikalische Trennverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfaches Verfahren • Geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Schlechte Ausbeute und Reinheit (Erhöhung der Lebensdauer des Poliermittels) • Zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle weitere Aufbereitung erforderlich
Hydrometallurgische Verfahren – Entfernung von Verunreinigungen	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ einfaches Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht alkalisch lösliche Verunreinigungen bleiben zurück und konzentrieren sich auf (Erhöhung der Lebensdauer des Poliermittels) • Verringerung der Korngröße der Ceroxidpartikel
Hydrometallurgische Verfahren – Gewinnung der Seltenerdmetallmischung	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewinnung der Seltenerdmetalle (Cer und Lanthan) 	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Schritte • Hoher Chemikalienbedarf • Erzeugung von großen Mengen Abwasser
Hydrometallurgische Verfahren – selektive Gewinnung der Seltenerdmetalle	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Cer und Lanthan werden getrennt gewonnen 	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Schritte • Hoher Chemikalienbedarf • Erzeugung von großen Mengen Abwasser • Schlechte Ausbeuten
Pyrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Anfall von Abwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energieverbrauch • Verbrauch großer Mengen gasförmigen Chlors • Korrosionsanfällig
Einsatz in Keramikglasur oder Gießereien	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfaches Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Art der Verunreinigung nicht für alle Poliermittel geeignet

3.2.2.2 NiMH-Batterien

NiMH-Batterien enthalten 36-42 % Nickel, 3-4% Kobalt und 8- 10 % Seltenerdmetalle (Binnemans et. al. 2013; S. 12). Üblich ist die Verwertung der Batterien in der Stahlproduktion, wobei die Seltenerdmetalle in der Schlacke verloren gehen.

Zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle aus NiMH-Batterien wurden sowohl hydro- als auch pyrometallurgische Verfahren untersucht.

Die **hydrometallurgischen Verfahren** umfassen die Laugung von NiMH-Schrott mit mineralischen Säuren und die anschließende Fällung der Seltenerdmetalle. Auch die Abtrennung der Seltenerdmetalle mit Solventextraktion und anschließender Fällung ist möglich.

Umicore und Rhodia (heute Solvay) haben 2011 bekannt gegeben, dass sie gemeinsam ein Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus NiMH-Batterien entwickelt haben. Das Verfahren basiert auf der Ultra-High-Temperature-Schmelztechnologie von Umicore. Eine Pilotanlage befindet sich in der Nähe von Antwerpen und kann neben NiMH-Batterien auch Lithiumionenbatterien verarbeiten. Die Batterien werden zusammen mit Koks einem Schachtofen zugeführt. Von unten wird sauerstoffreiche Luft in den Schachtofen geblasen. Durch das Verbrennen des Kunststoffes und des organischen Elektrolyts der Batterien wird so viel Energie erzeugt, dass nur wenig externe Energie zugeführt werden muss. Die Metalle werden zu einer Ni-Co-Cu-Fe Legierung und einer Schlacke umgesetzt. Die Schlacke besteht hauptsächlich aus Ca, Al, Si und Fe und den Seltenerdmetallen. Diese Schlacke kann weiter aufbereitet werden, um ein Seltenerdmetall-Konzentrat zu gewinnen, das anschließend als Inputmaterial in der Seltenerdmetall-Trennanlage von Rhodia eingesetzt werden kann (Binnemans et. al 2013; S. 12).

Tabelle 71 gibt einen Überblick über die Verfahren zum Recycling von NiMH-Batterien und ihre Vor- und Nachteile.

Tabelle 71: Recyclingverfahren für NiMH-Batterien

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> NiMH-Schrott (zerkleinert ohne Kunststoffe und Wasserstoff) 	<ul style="list-style-type: none"> Eher geringe Investitionskosten Möglichkeit der Wiedergewinnung von verschiedenen Fraktionen, die getrennt vermarktet werden können 	<ul style="list-style-type: none"> Batterien müssen vorher zerlegt werden Hoher Chemikalienverbrauch
Pyrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> Batterien 	<ul style="list-style-type: none"> Verfahren bereits entwickelt Energie aus den Kunststoffen wird direkt verwertet Aufbereitungsschritte entsprechen der Seltenerdmetall-Gewinnung aus Erzen 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Investitionskosten Seltenerdmetalle müssen aus der Schlacke wiedergewonnen werden Seltenerdmetalle werden als Mischung abgetrennt (weitere Auftrennung nötig)

3.2.2.3 Spezialgläser

Quelle: Binnemans et. al. 2013; S. 7

Es wurden bisher nur wenige Untersuchungen zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Spezialgläsern durchgeführt. Vorgeschlagen wird ein hydrometallurgischer Prozess, der zunächst die Umwandlung der Seltenerdmetalle zu unlöslichen Seltenerdmetall-Hydroxiden durch Behandlung mit konzentrierter heißer Natronlauge beinhaltet. Anschließend erfolgt eine Laugung mit heißer Salzsäure. Die dabei gebildete wässrige Seltenerdmetall-Chlorid-Lösung kann als Input in einer Seltenerdmetall-Trennanlage verwendet werden.

Tabelle 72: Recyclingverfahren für Spezialgläser

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> Spezialgläser 	<ul style="list-style-type: none"> Einziges bisher untersuchtes Verfahren Hohe Rückgewinnungsraten erreichbar 	<ul style="list-style-type: none"> Viele Verfahrensschritte Verbrauch von großen Mengen an Chemikalien Erzeugung von großen Mengen Abwasser

3.2.2.4 FCC-Katalysatoren

Zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus FCC-Katalysatoren liegen nur wenige Untersuchungen vor. Vorgeschlagen wird die Rückgewinnung die Laugung mit Säuren.

Tabelle 73: Recyclingverfahren für FCC-Katalysatoren

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> FCC Katalysatoren 	<ul style="list-style-type: none"> Momentan das einzige verfügbare Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Viele Verfahrensschritte Verbrauch von großen Mengen an Chemikalien Erzeugung von großen Mengen Abwasser Noch relativ schlechte Rückgewinnungsraten

3.2.2.5 KFZ-Katalysatoren (Quelle: Steinlechner, Antrekowitsch, 2015)

Das Recycling von KFZ-Katalysatoren konzentriert sich auf die Rückgewinnung der Edelmetalle. Bei der üblichen pyrometallurgischen Aufbereitung finden sich die Seltenerdmetalle in der Schlacke. Dabei ist die Konzentration in der Schlacke so gering, dass eine Wiedergewinnung mittels hydrometallurgischer Verfahren zwar möglich, aber zu aufwendig und kostenintensiv ist. Eine andere Möglichkeit ist die Rückgewinnung der Seltenerdmetalle und der Edelmetalle in einem gemeinsamen hydrometallur-

gischen Verfahren. Dafür wird der zermahlte Monolith mit Säure gelaugt und die Edelmetalle und die Seltenerdmetalle in mehreren Schritten aus der Lösung abgetrennt.

Tabelle 74: Recyclingverfahren für KFZ-Katalysatoren

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Monolith 	<ul style="list-style-type: none"> • Eher geringe Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Chemikalienverbrauch • Erzeugung von großen Mengen an Abwasser
Hydrometallurgisches Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Schlacke aus Edelmetallgewinnung 	<ul style="list-style-type: none"> • Universell einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Chemikalienverbrauch • Erzeugung von großen Mengen an Abwasser

3.2.3 Recyclingverfahren für indiumhaltige Abfallströme

Der Prozess zur Rückgewinnung von Indium aus LC-Displays umfasst 4 Schritte. Der erste Schritt ist Gewinnung des ITO-Glases aus den ausgebauten Displays. Dafür werden drei unterschiedliche Methoden vorgeschlagen: die Pyrolyse, physikalisch-chemische Trennverfahren und die elektrische Desintegration.

Der zweite Schritt ist die Vorbereitung des ITO-Glases für die Laugung. Dabei wird das ITO-Glas gemahlen. Im dritten Schritt wird das Indium abgetrennt. Dafür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zum einen kann das Material mit Chlorwasserstoffgas oder Ammoniumchlorid behandelt werden. Das dabei gebildete Indiumchloridgas kann anschließend in Natronlauge adsorbiert werden. Auch eine Laugung mit Säuren ist möglich. Aus der Lösung kann das Indium anschließend mittels Lösemittelextraktion oder durch Adsorption an einer Säule abgetrennt werden. Um reines Indium zu gewinnen, ist als letzter Schritt eine Aufreinigung des Indiums z. B. mittels Zonenschmelzverfahren erforderlich.

Tabelle 75: Recyclingverfahren für indiumhaltige Abfallströme (Quelle: Zhang et. al. 2015)

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Pyrolyse (unter Stickstoffatmosphäre)	<ul style="list-style-type: none"> • Zerkleinerte LCD-Displays, ohne Hintergrundbeleuchtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Flüssigkristalle werden zersetzt • Kaum Verunreinigungen im gewonnenen ITO-Glas • Organische Verbindungen werden in Pyrolyse Gas und Öl umgewandelt und können als alternative Brennstoffe eingesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Energieverbrauch • Pyrolysegas mit großen Mengen Stickstoff verunreinigt (→ Aufbereitung notwendig) • Hohe Kosten (Stickstoffverbrauch, NO_x-Abtrennung, Abgasaufbereitung aufgrund von unvollständiger Pyro-

			lyse)
Pyrolyse (unter Vakuum)	<ul style="list-style-type: none"> Zerkleinerte LCD-Displays , ohne Hintergrundbeleuchtung 	<ul style="list-style-type: none"> Flüssigkristalle werden zersetzt Kaum Verunreinigungen im gewonnenen ITO-Glas Organische Verbindungen werden in Pyrolyse Gas und Öl umgewandelt und können als alternative Brennstoffe eingesetzt werden Geringere Kosten (Kein Stickstoffverbrauch, reineres Pyrolysegas, tiefere Temperaturen und damit geringerer Energieverbrauch) 	<ul style="list-style-type: none"> Komplexes Verfahren Hoher Energieverbrauch
Physikalisch-Chemische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> LCD-Displays 	<ul style="list-style-type: none"> Technisch leicht umzusetzen Flüssigkristalle können wiedergewonnen werden Geringer Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> Geringere Effizienz Chemikalieneinsatz (Aceton)
Elektrische Desintegration	<ul style="list-style-type: none"> LCD-Display 	<ul style="list-style-type: none"> Geringere Indiumverluste Hohe Indiumrückgewinnung bei geringem Säureverbrauch im anschließenden Laugungsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> Noch nicht großtechnisch eingesetzt

3.2.4 Recyclingverfahren für Leuchtstoffe

Für das Recycling von Leuchtstoffen wurden drei Alternativen untersucht: die direkte Wiederverwendung als Leuchtstoff, die Trennung des Leuchtstoffs in seine Bestandteile und die Rückgewinnung der Seltenerdmetalle. Tabelle 76 gibt eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der Verfahren

Tabelle 76: Recyclingverfahren für leuchtstoffhaltige Abfallströme

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Direkte Wiederverwendung Abtrennung der Leuchtstoffe durch physikalisch-chemische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Lampen mit einheitlichen Leuchtstoffzusammensetzungen und -qualitäten 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr einfaches Verfahren Keine chemische Behandlung nötig 	<ul style="list-style-type: none"> Schlechte Qualität (verschlechterung des Leuchtstoffs über die Nutzungsdauer, Verunreinigungen, veränderte Partikelgröße) Notwendige Sortenreinheit der Lampen ist schwer zu realisieren
Trennung des Leuchtstoffs in Bestandteile Physikalisch-chemische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Alle Leuchtstoffmischungen 	<ul style="list-style-type: none"> Einfaches Verfahren Keine oder nur geringe Mengen an Chemikalien werden verbraucht 	<ul style="list-style-type: none"> Oft schlechte Qualität (Verschlechterung des Leuchtstoffs über die Nutzungsdauer, veränderte Partikelgröße, Verunreinigung) Oft geringe Wiedergewinnungsquoten
Wiedergewinnung der Seltenerdmetalle Hydrometallurgische Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> Alle Leuchtstoffmischungen 	<ul style="list-style-type: none"> Universell anwendbar Bekanntes Verfahren (prinzipiell gleiche Aufbereitungsschritte wie bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen aus Erzen) Wiedergewinnung von sehr reinen Seltenerdmetall-Oxiden, die auch für andere Anwendungen geeignet sind 	<ul style="list-style-type: none"> Aufwendiges Verfahren Verbrauch an großen Mengen Chemikalien Erzeugung großer Mengen Abwasser

3.2.5 Zeitbedarf für den Aufbau von Verwertungslösungen

Der für den Aufbau von Verwertungslösungen erforderliche Zeitraum ist vorab nur schwer zu beurteilen. Im Falle von bisher nicht großtechnisch betriebenen Verwertungsprozessen ist zunächst der Zeitbedarf zum Aufbau der technischen Anlagen einzugrenzen. Soll es sich dabei beispielsweise um einen neu aufzubauenden, komplexen hydrometallurgischen Prozess handeln, so muss nach optimistischer Schätzung etwa mit folgenden Realisierungszeiten gerechnet werden:

- Integration in bestehende Anlage
 - Bedarfsanalyse und Definition Projektumfang: 6 Monate
 - Engineering, Bestellung und Beschaffung: 4 Monate
 - Lieferzeit: 3 Monate
 - Realisierung und Inbetriebnahme: 6 Monate
 - Genehmigungsprozess: parallel

Gesamt: 19 Monate bzw. knapp zwei Jahre

Annahme: Entwicklung für technischen Maßstab abgeschlossen

- Neubau einer Anlage
 - Genehmigung: 18 Monate
 - Bedarfsanalyse und Definition Projektumfang, Ausschreibung: 9 Monate
 - Engineering, Bestellung und Beschaffung: 9 Monate
 - Lieferzeit: 12 Monate
 - Realisierung: 6 Monate
 - Inbetriebnahme und Übergabe: 6 Monate

Gesamt: 56 Monate bzw. knapp fünf Jahre

Annahme: Entwicklung für technischen Maßstab abgeschlossen

Bei einfacheren mechanischen Prozessen ist dieser Zeitraum deutlich kürzer. Sobald der hierzu erforderliche Anlagenbau aber über geringfügige Ergänzungen oder Anpassungen bestehender Anlagen hinausgeht, ist auch in solchen Fällen kaum mit einer Realisierung in weniger als 12 Monaten zu rechnen.

Über diesen Kernvorgang hinaus können weitere zeitbestimmende Faktoren zum Tragen kommen, zum Beispiel:

- Je nach Entwicklungsstand der einzusetzenden Technologien kann die erforderliche Entwicklung (z.B. vom Labor- in den Produktionsmaßstab) mehrere Jahre in Anspruch nehmen.
- Falls Gebäude neu errichtet oder wesentlich umgestaltet werden müssen, ist die Zeit für Bauplanung und Bau zu berücksichtigen.
- Bei größeren Investitionen unter Einbindung mehrerer Partner kommt der Zeitaufwand für die Aushandlung von Verträgen hinzu.
- Bei Genehmigungsprozessen mit Öffentlichkeitsbeteiligung kann es zu mehrjährigen Verzögerungen kommen.
- Sind als Voraussetzung rechtliche Vorgaben erforderlich, so kann deren Realisierung mehrere Jahre dauern. Dies gilt insbesondere im Falle europarechtlicher Regelungen, die ins nationale Recht überführt werden müssen. Je nach politischer Lage können aber auch im Falle im Bun-

desrat zustimmungspflichtiger nationaler Regelungen bis zum Inkrafttreten zehn Jahre und mehr vergehen.

- Sind Veränderungen an den zu verwertenden Produkten Voraussetzung zur Verwertung (z.B. Kennzeichnung von NdFeB-haltigen Motoren), so hängt die Realisierung dieser Voraussetzungen von der Produktlebensdauer ab, die bei langlebigen Gütern ein bis mehrere Jahrzehnte betragen kann. In solchen Fällen ist dieser Faktor zeitbestimmend. Diese Veränderungen beginnen in der Regel erst nach Wirksamwerden entsprechender Rechtsvorschriften.
- Bei größerem Zeitbedarf kann es zum Rückzug der Unternehmen kommen, die die Anlagentechnik realisieren wollten. Mögliche Ursachen sind mannigfaltig und reichen von Geschäftsführerwechsel und Änderungen der Eigentümerstruktur über Finanzierungsprobleme und vorübergehend fallenden Rohstoffpreisen bis hin zu Änderungen der Konkurrenzsituation am Markt. Ein wesentlicher Faktor können auch neue Technologien sein, die über Änderungen der Produktgestaltung dazu führen, dass die Bedeutung der zu verwertenden Produkte am Markt abnimmt und damit die strategischen Erfolgchancen des Verwertungsprozesses sinken.

Auch wenn sich die Verzögerungen durch diese Faktoren nicht unbedingt addieren weil viele Prozesse parallel abgearbeitet werden können (z.B. Gebäudeplanung und Anlagenplanung), wird deutlich, dass der Realisierungszeitraum neuer Verwertungsprozesse nur sehr begrenzt vorhersehbar ist. Zeitlich besonders kritisch sind dabei Verwertungsprozesse, die

- sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstand (Labormaßstab) befinden und/oder
- komplexe Technologien benötigen und/oder große Investitionssummen erfordern und/oder
- auf Erlass und Umsetzung rechtlicher Regelungen für langlebige Produkte aufbauen.

Der Mindest-Zeitbedarf für den Aufbau von Verwertungsverfahren wird für die zu analysierenden Abfälle wie folgt abgeschätzt:

- NdFeB-Magnete: überwiegend mehr als 10 Jahre. Begründung: Nach Durchsetzung demontagegerechter Konstruktion auf breiter Basis werden aufgrund der Langlebigkeit der meisten Produkte mehr als zehn Jahre bis zum Rücklauf größerer Stückzahlen demontagefreundlicher Produkte angesetzt. Verwertungsverfahren können in dieser Zeit parallel weiter entwickelt und aufgebaut werden.
- Cer-/lanthanhaltige Poliermittel: 2 Jahre. Begründung: die Verfahren stehen grundsätzlich zur Verfügung. Erforderlich sind das Zusammenführen der Akteure und der Aufbau von Qualitätssicherungsprozessen.
- Separierte indiumhaltige Glasfraktionen aus der Aufbereitung von LCD: 5 Jahre. Begründung: Das Verfahren muss im Produktionsmaßstab entwickelt werden.
- Leuchtstoffe: 1-2 Jahre. Begründung: Die Verfahren stehen grundsätzlich zur Verfügung. Erforderlich ist eine Möglichkeit, die Verwertungsprozesse wirtschaftlich zu betreiben. Dies ist hier aufgrund der sinkenden Mengen eher unwahrscheinlich.

Diese Annahmen setzen voraus, dass die Verwertung zum Zeitpunkt des Anlagenaufbaus entweder wirtschaftlich profitabel oder rechtlich vorgeschrieben ist. Der angegebene Zeitbedarf rechnet sich ab dem Zeitpunkt zu dem dies gegeben oder verlässlich absehbar ist.

3.3 Lagergestaltung

3.3.1 Allgemeine Anforderungen an Abfallzwischenlager

Um die Lagergestaltung für die untersuchten Abfälle zu konzipieren, wurden zunächst die Anforderungen an die einzulagernden Abfälle bzw. Abfallfraktionen definiert. Dabei wurden, soweit bekannt, die künftig voraussichtlich zur Verwertung der Abfälle einzusetzenden Verfahren zugrunde gelegt und eine nach Art und Umfang aus heutiger Sicht realistische und angemessene Vorbehandlung der Abfälle dargestellt. Hierzu wurden insbesondere folgende Aspekte untersucht:

- Geeigneter Grad der Separation bzw. Aufbereitung vor der Einlagerung in der jeweils zweckmäßigen Form
- Mindestkonzentration des künftig zurückzugewinnenden Sondermetalls im Abfall als Kriterium für die Aufnahme ins Zwischenlager
- Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien, Komponenten, Störstoffe oder Schadstoffe
- Abwägung zwischen Vorbehandlungs- und Aufkonzentrierungsaufwand sowie Lageraufwand
- Zustand bei der Einlagerung (z. B. Aggregatzustand, Korngröße, evtl. Konditionierung)
- Eigenschaften der einzulagernden Abfälle (Zusammensetzung, Gefahrenpotenzial, Stoffverhalten (z. B. Auslaug- oder Emissionsverhalten), maximal tolerierbare Schadstoffgehalte)
- Darstellung und Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen an den Input der in Entwicklung befindlicher Verfahren soweit bekannt

Bei den betrachteten Abfallströmen dürfte eine Lagerung in geeigneten Räumlichkeiten erforderlich sein, um die Möglichkeit zur gezielten, individuellen und zuordenbaren Ein- und Auslagerung von Teilmengen des gelagerten Gutes zu schaffen, um das Gut vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen, aber auch um den Wert zu sichern, der über den reinen Materialwert hinaus in dem zur Separation des Materials investierten Aufwand (z.B. Arbeitszeit) besteht.

Dieser Abschnitt beschreibt daher zunächst grundsätzliche Anforderungen an Zwischenlager, die nicht für jeden Abfall in vollem Umfange zutreffend sein werden. Dabei wurden insbesondere die Anforderungen der Deponieverordnung an Langzeitlager sowie die Informationen der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (M 062 Lagerung von Gefahrstoffe), der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (TRGS 509, TRGS 510, TRGS 520), der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGI 582) und der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGI/GUV-I 5166) ausgewertet. Die spezifischen Anforderungen an die Lagerung für die zu betrachtenden Abfallströme wurden dann jeweils zusätzlich erarbeitet.

Prinzipiell gliedert sich ein Lager in folgende Bereiche (s. Abbildung 23):

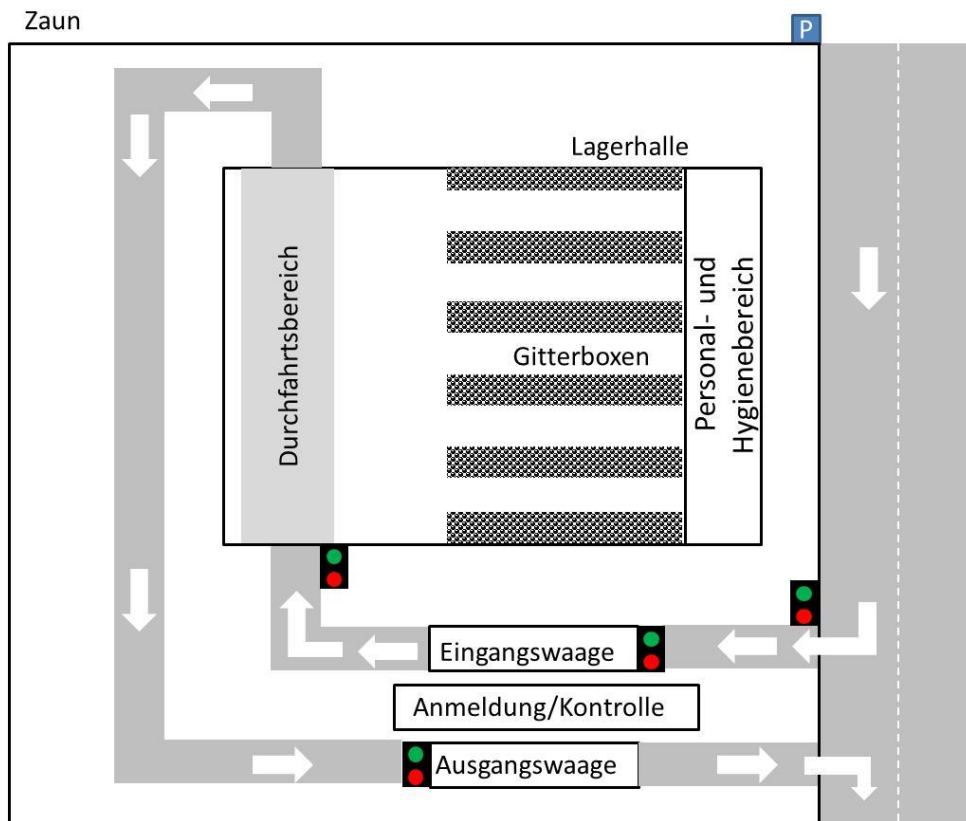
- Verkehrsbereich
- Umschlagbereich
- Lagerbereich
- Hygiene-, Sozial- und Aufenthaltsbereiche

Für den Brand oder Leckagefall ist ein Alarmplan zu erstellen. Für Einsatzkräfte sollten folgende Informationen zur Verfügung stehen:

- Hinweise auf besondere Gefährdungen
- Schutzmaßnahmen gegen Gefährdungen
- Zu ergreifende Maßnahmen bei Freisetzung

- Zu ergreifende Maßnahmen bei Exposition von Personen
- Zu ergreifende Maßnahmen im Brandfall
- Zu ergreifende Maßnahmen gegen Umweltschäden

Abbildung 23: Lageraufbau, Prinzipskizze



Zur Bestimmung der allgemeinen Anforderungen an ein Zwischenlager wurden weiterhin Kriterien und Anforderungen an die Gestaltung von Lagern aus Bereichen, wie z. B. Rohstofflager, Wertstoffdepots, Lager für Stoffe und Gemische, Abfalllager und Ein- und Ausgangslager von Behandlungs- bzw. Rückgewinnungsanlagen für edel- und sondermetallhaltige Abfälle ausgewertet.

Bei der Errichtung von Lagern für Abfälle, Stoffe oder Gemische sind verschiedene Punkte zu berücksichtigen. Bei der Wahl des Standortes sollte auf eine gute Zugänglichkeit für Feuerwehr und Rettungsdienste geachtet werden. Die Errichtung sollte nicht in Wasserschutzgebieten, Überschwemmungsgebieten und Katastrophenbereichen von Staudämmen oder Speicheranlagen erfolgen. Es ist auf eine gute Infrastruktur-Anbindung zu achten, so dass Verkehrsbehinderungen vermieden werden. Im Anlieferbereich sollten Rückwärtsfahrten vermieden werden.

Die Lagerung selbst hat übersichtlich und geordnet zu erfolgen. Freiwerdende Stoffe müssen erkannt, aufgefangen und beseitigt werden können. Behälter sind regelmäßig auf Beschädigung zu überprüfen. Die maximale Lagermenge muss festgelegt und eingehalten werden. Im Lagerbereich ist Rauchen und Essen verboten.

Die Lagerung darf nur in geeigneten Behältern erfolgen. Lagereinrichtungen müssen gegebenenfalls ausreichend belastbar sein. Bei Bedarf sind Sicherungen gegen Heraus- bzw. Herabfallen zu verwenden. Außerdem muss auf einen ausreichenden Anfahrtschutz geachtet werden. Bei Stapelung muss die Standsicherheit gewährleistet sein.

Es ist eine erstmalige und dann regelmäßige Prüfung der Funktion, Zuverlässigkeit und Wirksamkeit von z. B. Lagereinrichtungen, Auffangeinrichtungen, Entsorgungseinrichtungen, Lüftungseinrichtungen und Augen- und Körperduschen durchzuführen.

Bei den baulichen Ausführungen ist auf ausreichend witterungsgeschützte Aufbewahrung und Handhabung der Abfälle und auf ausreichende Anzahl und Breite von Fluchtwegen zu achten. Die Verkehrswege sollten fugenfrei und befestigt (z. B. asphaltiert) ausgeführt sein. Es sollten flüssigkeitsdichte, säure- und chemikalienfeste, elektrisch ableitende Böden verwendet werden. Die Böden sollten gut zu reinigen und auch im feuchten Zustand trittsicher sein. Ausgelaufene oder verschüttete Abfälle sollten leicht erkannt und gut entfernt werden können. Die Böden sollten zudem wannenförmig ausgearbeitet sein. Stolperfallen sind zu vermeiden. Je nach Lagergut sind Löschwasserrückhaltungssysteme notwendig.

Der bauliche Brandschutz ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Zum Schutz gegen Brandstiftung ist zu gewährleisten, dass Unbefugte keinen Zugang auf das Gelände haben. Während des Betriebs sind die Zugänge zu überwachen. Weitere Möglichkeiten sind Einbruchmeldeanlagen, nächtliche Beleuchtungen und Wachdienst. Innenrundgänge des Wachdienstes helfen zudem frühzeitig Brände zu erkennen.

Für den Brand oder Leckagefall ist ein Alarmplan zu erstellen. Für Einsatzkräfte sollten folgende Informationen zur Verfügung stehen:

- Hinweise auf besondere Gefährdungen
- Schutzmaßnahmen gegen Gefährdungen
- Zu ergreifende Maßnahmen bei Freisetzung
- Zu ergreifende Maßnahmen bei Exposition von Personen
- Zu ergreifende Maßnahmen im Brandfall
- Zu ergreifende Maßnahmen gegen Umweltschäden

Für den Personenschutz ist je nach Abfallart auf passende Schutzausrüstung zu achten. Hygienische Maßnahmen (Waschgelegenheiten, Arbeitskleidung) und Erste Hilfe Maßnahmen müssen ausreichend vorhanden sein.

Zur Dokumentation der angelieferten und entnommenen Mengen ist eine (Fahrzeug-) Waage notwendig.

3.3.2 Organisatorische Randbedingungen der Lagerung

Unabhängig von der Rollenverteilung unter den Akteuren sind bei Einrichtung und Betrieb eines Langzeitzwischenlagers im Falle derzeit noch nicht realisierter Verwertungslösungen einige Schnittstellenfaktoren zu berücksichtigen, die hier gegliedert nach den wesentlichen Prozessschritten bei Betrieb des Lagers dargestellt werden. Zur Schnittstellenanalyse wurde im Februar 2018 ein Workshop mit Experten und Akteuren relevanter Wertschöpfungsketten durchgeführt. In Form eines rollenspielartigen Perspektivenwechsels wurden die voraussichtlichen Vorgänge bei Betrieb eines Langzeitzwischenlagers durchgespielt sowie die zu erwartenden Verhaltens- und Sichtweisen der das Lager versorgenden, das Lager betreibenden und aus dem Lager Material beziehenden Akteure. Die Ergebnisse sind in diesen Abschnitt eingearbeitet.

Gewinnung des einzulagernden Materials: Die zentrale Frage ist hier, wie die verantwortlichen Akteure, z.B. Demontagebetriebe, zur Gewinnung des einzulagernden Materials motiviert werden bzw. wer ihren Aufwand finanziert. Grundsätzlich denkbar ist etwa eine Vergütung für die am Zwischenlager angelieferten Mengen, deren Finanzierung aber wiederum zu klären ist. Kritisch ist dabei die Frage

der Höhe der Vergütung, da für diese Materialien in der Regel kein Marktpreis existiert. Alternativ könnten die Gewinnung der Fraktionen und deren Anlieferung ans Zwischenlager im Rahmen des ElektroG oder der AltfahrzeugV verpflichtend festgelegt werden. Die Finanzierung wäre in diesem Falle zwischen dem Akteur und seinen Auftraggebern zu klären. Ähnlich stellt sich die Frage dar, ob und wie ggfs. dem Akteur durch die Zwischenlagerung entgangene Schrottwerte zu vergüten wären (z.B. Schrottwert von Rotoren, die mitsamt den enthaltenen NdFeB-Magneten eingelagert werden). Ferner ist zu bedenken, dass die Akteure über die Notwendigkeit der Gewinnung des Materials und über die damit verbundenen Prozesse sowie über die Qualitätsanforderungen an das Material informiert werden und dass ggfs. geprüft wird, ob sie ihrer Verpflichtung zur Gewinnung des Materials nachkommen.

Anlieferung und Einlagerung: Hier ist zu klären, wer die Bereitstellungs- und Transportkosten zahlt. Dies dürfte zunächst zweckmäßigerweise dem Akteur obliegen, der das Material gewinnt. Die Frage ist, ob er für diese Kosten einen Ausgleich erhält. Zentral ist zudem die Kontrolle der Eingangsqualität des Materials: Wie wird diese kontrolliert und welche Maßnahmen werden bei unzureichender Qualität ergriffen? Auch die Frage, wie Herkunft und Art des Materials dokumentiert werden und wie angesichts der Tatsache, dass es hierfür noch keine Abnehmer gibt, die Qualität der Dokumentation und der Eingangskontrolle gewährleistet wird, ist zu klären.

Lagerung: Da dieser Prozessschritt weitgehend unabhängig von anderen Akteuren erfolgt, dürften Schnittstellenprobleme hier keine große Rolle spielen.

Auslagerung und Abgabe: Eine zentrale Schnittstellenfrage ist hier die der Preisfindung: Wer legt den Preis für das Material fest? Welche Rolle spielen dabei Angebot und Nachfrage? Nach welchen Kriterien wird das Material vergeben, wenn die Nachfrage größer ist als das Angebot? Was geschieht, wenn das Material (ggfs. zu den angebotenen Konditionen und/oder in der vorliegenden Qualität) nicht absetzbar ist? Wer haftet für die Qualität des ausgelieferten Materials? Die letzte Frage ist vor allem deshalb kritisch, weil zum Zeitpunkt der Einlagerung Verwertungsverfahren und damit auch prozessgeprüfte Qualitätsanforderungen noch nicht existieren.

In welcher Weise diese Fragen zu beantworten sind, hängt wesentlich von den Voraussetzungen und Randbedingungen des Lagerbetriebs und den beteiligten Akteuren ab. Erst wenn diese Faktoren feststehen, können die Antworten mit und zwischen den Akteuren erarbeitet werden.

Die rechtlichen Anforderungen an ein solches Lager und grundlegende Fragen, wie die, wer Betreiber eines solchen Lagers sein kann oder wie die Finanzierung von Einrichtung, Betrieb und Rückbau des Lagers erfolgen kann, werden in Kapitel 3.5 diskutiert.

3.3.3 Lagerung zur Rohstoffbevorratung

Es gibt keine Hinweise darauf, dass aktuell innerhalb der EU nicht-Energie Rohstoffe bevorratet werden. Es gab zwischen 1970 und 1980 Vorratsprogramme in Frankreich, Slowenien, Schweden und dem Vereinigte Königreich. Die Lagerung von nicht-Energie Rohstoffen wird vor allem in China, Japan, Südkorea und den USA praktiziert. Es liegen jedoch nur wenige Informationen zur Organisation der Lager in in diesen Ländern vor. In allen vier Ländern ist die Lagerung von der Regierung organisiert. In Japan gibt es für verschiedene Materialien auch nicht-verpflichtende Lagerziele für private Unternehmen. Südkorea und Japan versuchen die Mengen an kritischen Materialien einzulagern, die sie in 60 Tagen verbrauchen bzw. importieren (RPA 2012; S. 12).

In den USA wird die Analyse, Planung, Beschaffung und das Management von Materialien, die für die nationale Sicherheit wichtig sind, von der Defense Logistics Agency (DLA) Strategic Materials durchgeführt. Informationen zur Lagergestaltung und -organisation wurden im Wesentlichen der Homepage der Defense Logistics Agency (Defense Logistic Agency 2017) entnommen.

Die Lagerung erfolgt in geschlossenen („covered“) oder offenen („open“) Lagerflächen. Geschlossener Lagerraum beinhaltet Warenhäuser (geheizt, ungeheizt und mit kontrollierter Luftfeuchtigkeit), Tresorräume, Hütten, Tanks, Iglus, Lagerhäuser und ähnliche Strukturen. Offene Lagerräume beinhalten verbesserte (befestigte), halb-verbesserte (bodenstabilisierte) und unverbesserte Lagerflächen. Die Auswahl eines geeigneten Standortes erfolgt auf Grundlage einer Analyse von zur Verfügung stehendem Raum, Kosten, Umweltschutzbedenken, Transportkosten, Nähe zu Produzenten und Verbrauchern, Kosten zur Erschließung und Sicherheitsanforderungen.

Das Defense National Stockpile Center (DNSC) und/oder das DLA Strategic Materials erstellen Spezifikationen zu den einzulagernden Materialien. Diese Spezifikationen beinhalten die Form und Qualität für die Einlagerung und industrielle Nutzung der Materialien. Diese Spezifikationen werden sowohl zum Ankauf der Materialien als auch zur Erstellung von Lageranweisungen verwendet.

Sie beinhalten in der Regel folgende Informationen:

- Beschreibung des Materials
- Chemische Anforderungen
- Physikalische Anforderungen
- Spezifikationen für Probenahme, Inspektionen und Tests
- Spezifikationen zur Verpackung
- Kennzeichnungsanleitungen
- Dokument-Identifikation
- Transport und Handhabungshinweise

Die Lagerung hat so zu erfolgen, dass jederzeit eine komplette Inventur durchgeführt werden kann. Dafür sind bestimmte Vorschriften je nach Lagereinheit zu berücksichtigen.

Z. B. sind Säcke in gerader Anzahl in Kistenpaletten zu lagern, außer wenn eine ungerade Anzahl in der obersten Palette eines Stapels die Gesamtmenge auffüllt. Die Paletten sind in Form einer Blocklagerung in gleichmäßigen Reihen und identischer Höhe zu lagern. Jeder Block muss mit einer Identifikationskarte ausgestattet sein, in der die Anzahl Säcke jeder Kistenpalette des Stapels angegeben ist.

Für Fässer, Tonnen, Behälter und andere Materialien gelten vergleichbare Vorschriften, die es ermöglichen, jederzeit schnell die Gesamtanzahl zu ermitteln. Wird bei der Inventur eine zu große Abweichung zwischen den tatsächliche eingelagerten Mengen und den theoretisch eingelagerten Mengen festgestellt, werden vorgeschriebene Prozeduren eingeleitet.

Die Identifikation des eingelagerten Materials erfolgt bei Schüttungen über ein festes Metallschild, das vor Ort angebracht ist. Auf diesem Schild sind das Material, der Typ, die enthaltenen Materialien mit Prozentangabe und das Herkunftsland angegeben. In geschlossenen Lagerräumen werden „Warehouse Material Identification Cards“ verwendet. Diese beinhalten Informationen zu Typ, Gruppe und Menge und werden an jeder Reihe oder an jedem Stapel so angebracht, dass jederzeit eine Inventur durchgeführt und Material ausgelagert werden kann.

Sämtliche Aufzeichnungen und Dokumente dürfen frühestens sechs Jahre nach der Auslagerung dieser Materialart zerstört werden. Es sind vierteljährlich Berichte an die Operations and Logistics-Abteilung zu übermitteln. Diese beinhalten die Lagernummer, die Sektion des Lagers, den Typ des Lagers, die maximale Lagerhöhe, das eingelagerte Material, die Menge des eingelagerten Materials, den Lagerfaktor (genutzte Fläche geteilt durch die Materialmenge), Gesamtfläche, nutzbare Fläche, genutzte Fläche und freie Fläche.

Bei offenen Lagerflächen ist die Identifikation des Standorts anzugeben, das eingelagerte Material, die Menge des eingelagerten Materials, Gesamtfläche, genutzte Fläche und freie Fläche.

Zusätzlich muss jedes Depot, in dem verschiedene Materialien gleichzeitig gelagert werden, über einen zuverlässigen Positionsgeber verfügen, um schnell spezifisches Material zu finden und langes Suchen zu vermeiden. Dazu wird standardmäßig ein Positionsnummernsystem verwendet.

Es werden verschiedene Vorkehrungen getroffen, um Gesundheits- und Umweltschutz sowie sichere Handhabung und Lagerung zu gewährleisten. Dazu gehört z. B. die regelmäßige Überprüfung, ob Feuchtigkeit in geschlossene Lagerräume eingedrungen ist. Einmal monatlich werden dafür die Dächer, Türen, Simse, Fenster und Ventilatoren inspiziert. Außerplanmäßige Kontrollen werden nach Regen- und Schneefällen und Stürmen durchgeführt. Gestapelte Lagergüter sind dabei auch von oben zu überprüfen.


3.3.4 NdFeB-Magnete

3.3.4.1 Geeigneter Grad der Separation

In diesem Abschnitt werden für die zu untersuchenden Abfälle jeweils zunächst geeignete Separationsgrade und Einlagerungsformen herausgearbeitet und spezielle Hinweise zur Lagergestaltung gegeben.

Tabelle 77: Bewertung Separationsgrad für NdFeB-Magnete

Separationsgrad	Vorteile /Nachteile	Beurteilung
Ganzer Motor / ganzes Gerät	<ul style="list-style-type: none"> + Geringer Separationsaufwand + Geringer Informationsbedarf zur Separation + Entmagnetisierung vor Einlagerung nicht erforderlich - Sehr hoher Lagerraumbedarf - Weitere Separation für Verwertungsprozess notwendig - Bindung sehr großer Mengen an Material (gesamte Motoren) 	
Rotor	<ul style="list-style-type: none"> + Entmagnetisierung vor Einlagerung evtl. verzichtbar + Mittlerer Informationsbedarf zur Separation - Mitterer Separationsaufwand vor Einlagerung - Hoher Lagerraumbedarf - Hoher Energiebedarf zur Entmagnetisierung (sofern erforderlich) - Weitere Separation für Verwertungsprozess notwendig - Bindung großer Mengen an Material (gesamte Rotoren) 	
Magnet	<ul style="list-style-type: none"> + Geringer Lagerraumbedarf + keine Bindung von zusätzlichem Material + keine weitere Separation für Verwertungsprozess notwendig + Geringer Energiebedarf zur Entmagnetisierung 	

Separationsgrad	Vorteile /Nachteile	Beurteilung
	<ul style="list-style-type: none"> - Großer Separationsaufwand vor Einlagerung - Hoher Informationsbedarf zur Separation - Entmagnetisierung vor Einlagerung oder Verpackung mit Abschirmung erforderlich 	
Zerkleinerter Magnetschrott	<ul style="list-style-type: none"> + Geringster Lagerraumbedarf + keine Bindung von zusätzlichem Material + leichtes Handling + Geringer Energiebedarf zur Entmagnetisierung - Großer Separationsaufwand vor Einlagerung - Hoher Informationsbedarf zur Separation - Entmagnetisierung vor Einlagerung erforderlich - Zerkleinerung vor Einlagerung erforderlich (nach Demontage) - Nach Zerkleinerung und Mischung nicht mehr sortierbar 	

Durch Einlagerung ganzer Motoren bzw. Geräte kann die Bindung von Werten in Form von Arbeitszeit für die Demontage der Magnete vermieden werden. Motoren bzw. Geräte wiegen jedoch ein Vielfaches der enthaltenen Magnete. Die Einlagerung in dieser Form ist damit vor allem aufgrund der damit gebundenen sehr großen Mengen an verwertbarem und wertvollem Material nicht zielführend.

Die Einlagerung separierter Magnete erscheint eher geeignet. Problematisch bleibt die Wertbindung durch investierte Arbeitszeit, die dem anliefernden Demontagebetrieb entweder erstattet oder von diesem kostenlos erbracht werden müsste. Hinzu kommt die Notwendigkeit, die Magnete vor der Einlagerung und auch schon vor dem Antransport zum Zwischenlager entweder zu entmagnetisieren oder die Magnetfelder durch geeignete, aufwendigere Verpackung abzuschirmen.

Ein geeigneter Kompromiss könnte die Einlagerung von Rotoren sein. Die Bindung von zusätzlichem Material kann so erheblich reduziert werden. Möglicherweise kann in diesem Falle zudem bis zur künftigen weiteren Aufbereitung auf eine Entmagnetisierung bzw. Abschirmung weitgehend verzichtet werden.




Spezielle Bewertung in Sonderfällen:

- Für Magnete, die nicht in Rotoren verbaut sind, kommt nur eine Einlagerung entweder als separierte Magnete oder als zerkleinerter Magnetschrott in Frage.
- Für sehr kleine Magnete, etwa aus Festplatten oder Kopfhörern kommt eine Demontage aufgrund des hohen Aufwands nicht in Frage. Diese Magnete werden aller Voraussicht nach nur als zerkleinerter, separierter Magnetschrott anfallen. Damit kommt hier auch nur diese Einlagerungsform in Frage.

3.3.4.2 Geeignete Einlagerungsform




Die geeignete Einlagerungsform der Magnete ist von ihrer Größe und vom Grad der Separation abhängig.

Tabelle 78: Bewertung Einlagerungsform von kleineren und mittelgroßen Magneten (Magnete aus E-Fahrzeugen, kleine E-Motoren aus Pkw, Elektrofahrrädern, Industriemotoren)

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Korngröße für Schüttung eher ungeeignet Informationen zu einzelnen Teilmengen gehen verloren Nach Mischung nicht mehr sortierbar Nur möglich mit entmagnetisiertem Material	
In Behältern	Separate Lagerung problemlos möglich Gezielte Entnahme von Teilmengen möglich Informationen zu einzelnen Teilmengen bleiben erhalten Korngröße zur Lagerung in Behältern (z. B. Gitterboxen) geeignet Einzelne Behälter zur Reduzierung des Platzbedarfes stapelbar Lagerung in Behältern auch mit Rotoren möglich	




Kleinere und mittelgroße Magnete sollten in Behältern gelagert werden.

Tabelle 79: Bewertung Einlagerungsform von großen Magneten (Magnete aus Windenergieanlagen, medizinischen Geräten)

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Korngröße für Schüttung ungeeignet	
In Behältern	Größe für Aufbewahrung in Behältern eher nicht geeignet Lagerung auf Paletten Wenn keine vorhergehende Entmagnetisierung, dann sind einzelne Magnete voneinander abgeschirmt zu lagern Auch Rotoren sollten voneinander abgeschirmt gelagert werden	

Große Magnete sollten auf Paletten gelagert werden.

Tabelle 80: Bewertung Einlagerungsform von zerkleinerten Magnetschrotten (Magnete aus Festplatten, Kopfhörern)

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Korngröße für Schüttung geeignet Informationen zu einzelnen Teilmengen gehen verloren Nach Mischung nicht mehr sortierbar Nur möglich mit entmagnetisiertem Material	
In Behältern	Informationen zur einzelnen Teilmengen bleiben erhalten Gezielte Entnahme von Teilmengen möglich Korngröße zur Lagerung in Behältern geeignet (Fässer, Big Bags) Wenn keine vorhergehende Entmagnetisierung, dann sind einzelne Magnete voneinander abgeschirmt zu lagern	

Zerkleinerte Magnetschrotte sollten im entmagnetisierten Zustand in Behältern gelagert werden.

3.3.4.3 Anforderungen an NdFeB-Magnete für die Zwischenlagerung

Tabelle 81: Anforderungen an NdFeB-Magnete für die Zwischenlagerung

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • Magnete aus Festplatten • Magnete aus Kopfhörern, Lautsprechern • Magnete aus Nabendynamos • Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern • Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw • Magnete aus Elektrofahrzeugen (Antrieb) • Magnete aus Industriemotoren • Magnete aus Windenergieanlagen • Magnete aus Raumklimaanlagen • Magnete aus medizinischen Geräten (MRT)
Grad der Separation	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgebaute Magnete oder Rotoren; von grobem Fremdmaterial befreit
Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien, Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Umhüllungen aus Kunststoff / Metall soweit möglich

Vor der Einlagerung zu entfernende Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> keine
Mindestkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> 50-100 % Magnetanteil im einzulagernden Abfall, bei Einlagerung von Rotoren deutlich weniger
Zustand bei der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> Aggregatzustand: fest Masse: 2 g bis mehrere hundert kg Größe: 0,25 cm³ bis bei flächiger Magnetform 2-3 m Breite (oft gebogen) Konditionierung: entmagnetisiert oder in Abschirmbehältern
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Gefahrenpotential: gering Stoffverhalten: Korrosion wahrscheinlich (abhängig von Beschichtung); spröde Keine bekannten Schadstoffe
Qualitätsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> Nur NdFeB-Magnete, möglichst mit Angabe Magnettyp

3.3.4.4 Gestaltung des Zwischenlagers für NdFeB-Magnete

Die Gesamt-Seltenerdmetallgehalte der Magnete sind über die Abfallströme größtenteils ähnlich. Unterschiede gibt es vor allem in den Anteilen der verschiedenen Seltenerdmetalle (v.a. Neodym, Dysprosium, Praseodym). Allerdings können diese auch innerhalb eines Abfallstroms stark schwanken. Hinsichtlich ihres Stoffverhaltens unterscheiden sich die Magnete jedoch nicht. Die Gestaltung des Zwischenlagers ist daher für die verschiedenen Abfallströme abgesehen von der Einlagerungsform identisch.

Tabelle 82: Anforderungen an das Zwischenlager für Magnete

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> Magnete aus Festplatten Magnete aus Kopfhörern, Lautsprechern Magnete aus Nabendynamos Magnete aus Motoren von Elektrofahrrädern Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw Magnete aus Elektrofahrzeugen (Antrieb) Magnete aus Industriemotoren Magnete aus Windenergieanlagen Magnete aus Raumklimaanlagen Magnete aus medizinischen Geräten (MRT)
Einlagerungsform	<ul style="list-style-type: none"> Ausgebaute Magnete oder Rotoren; von grobem Fremdmaterial befreit
Einstufung	<ul style="list-style-type: none"> Nicht gefährlich
Menge pro Jahr	<ul style="list-style-type: none"> ca. 977 t (Gesamtaufkommen Magnetmaterial, Mittelwert aus voraussichtlichen Aufkommen 2020 und 2027, ohne Berücksichti-

	gen von Begleitmaterial, Verlusten bei der Sammlung, Demontage, etc.)
Max. tolerierbarer Schadstoffgehalt	<ul style="list-style-type: none"> • unbekannt
Qualitätsanforderungen des Verwertungsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • unbekannt
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung: ca. 20 - 31 Gew.-% Nd, 0 - 10 Gew.-% Pr, 0 bis 10 Gew.-% Dy • Gefahrenpotential: gering • Stoffverhalten: Korrosion wahrscheinlich (je nach Beschichtung) • Keine bekannten Schadstoffe
Dauer der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Über ein Jahr
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Umweltgefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> • Trocken und witterungsgeschützt lagern • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1) • Nicht mit Säuren zusammen lagern
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Brandstiftung	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Arbeitssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Schutzausrüstung bereitstellen (Augen- und Atemschutz bei staubenden Tätigkeiten, Handschuhe, Arbeitskleidung) • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Schutz vor Diebstahl	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Art des Zwischenlagers	<ul style="list-style-type: none"> • Geschlossene Lagerhalle (Schutz vor Witterung)
Platzbedarf (reine Lagerfläche, ohne Sozialräume Außenflächen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Jahre: Ca. 2.700 m² (bei Entmagnetisierung; sonst um Faktor 2 größer) (Raumhöhe mind. 5 m⁴⁰, Gesamtmenge ca. 5.000 t) (Annahme: Gitterboxen oder vergleichbare Behältern, 3-fache Stapelung der Behälter⁴¹, pro Behälter ca. 750 kg Material, 20 % Platz zum Rangieren) • 10 Jahre ca. 5.400 m² • (Raumhöhe mind. 5 m, Gesamtmenge ca.10.000 t)




⁴⁰ Torhöhe bei Einfahrt LKW ca. 4,2 m

⁴¹ Traglast Gitterbox 1.000 – 1.500 kg, Auflast 4.400 – 6.000 kg, stapelbare Einheiten 3 – 5 Stück (Richtwerte EPAL)

3.3.5 Cer-/lanthanhaltige Abfälle: Poliermittel

3.3.5.1 Geeigneter Grad der Separation




Tabelle 83: Bewertung Separationsgrad Poliermittel

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
Originalsubstanz	+ Geringer Aufbereitungsaufwand - Hoher Lagerraumbedarf - Hoher logistischer Aufwand - Je nach Einlagerungsart Austritt von Wasser möglich - Unrealistisch: schon heute Entsorgung im entwässerten Zustand	
Entwässert (Presse)	+ Mittlerer Lagerraumbedarf + Mittlerer logistischer Aufwand + Entwässerung findet bereits heute vor der Entsorgung statt - Mittlerer Aufbereitungsaufwand - Je nach Einlagerungsart Austritt von Wasser möglich - Evtl. Verbacken der Substanz - Bei hohen Temperaturen (z. B. bei Sonneneinstrahlung) evtl. Verdampfen des Wassers und Beschädigung (durch Korrosion, Schimmelbildung etc.) der Lagerhalle - Bei Frost evtl. Beschädigung der Behälter	
getrocknet	+ Geringster Lagerraumbedarf + Geringster logistischer Aufwand - Hoher Aufbereitungsaufwand - Hoher Energieaufwand bei der Aufbereitung - Evtl. zusätzliches Trocknungsaggregat an der Anfallstelle nötig	

Die Entwässerung über eine Presse ist der zu empfehlende Grad der Separation, da die Schlämme aus Kostengründen schon heute vor der Entsorgung entwässert werden.

3.3.5.2 Geeignete Einlagerungsform

Tabelle 84: Bewertung Einlagerungsform für Poliermittel

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Vorkehrungen zum Auffangen von austretendem Wasser nötig, staubt im trockenen Zustand	
In Behältern	Form geeignet zur Aufbewahrung in wasserdichten Behältern (z. B. Fässern, evtl. Big Bags)	

Eine Lagerung in Fässern oder ggfs. geeigneten Big Bags ist zu empfehlen.

3.3.5.3 Anforderungen an Poliermittel für die Zwischenlagerung

Tabelle 85: Anforderungen an Poliermittel für die Zwischenlagerung

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel
Grad der Separation	<ul style="list-style-type: none"> • entwässert (Presse)
Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien, Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser
Vor der Einlagerung zu entfernende Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • keine
Mindestkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> • 5%
Zustand bei der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Aggregatzustand: fest • Masse: teilweise pulverförmig • Größe: teilweise pulverförmig • Konditionierung: keine
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahrenpotential: gering • Stoffverhalten: unbekannt • Keine bekannten Schadstoffe
Qualitätsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • keine

3.3.5.4 Gestaltung des Zwischenlagers für Poliermittel

Tabelle 86: Anforderungen an das Zwischenlager für Poliermittel

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel aus der Glasherstellung
Einlagerungsform	<ul style="list-style-type: none"> • Poliermittel entwässert (Presse)
Einstufung	<ul style="list-style-type: none"> • i. d. R. nicht gefährlich
Menge pro Jahr	<ul style="list-style-type: none"> • ca. 400 t Poliermittel (Gesamtaufkommen, Mittelwert aus voraussichtlichen Aufkommen 2020 und 2027, ohne Berücksichtigen von Verlusten bei der Sammlung, Aufbereitung, etc.)
Max. tolerierbarer Schadstoffgehalt	<ul style="list-style-type: none"> • unbekannt
Qualitätsanforderungen des Verwertungsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • unbekannt (noch kein vollständig entwickeltes Verfahren vorhanden)
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung: >5 % • Gefahrenpotential: gering • Stoffverhalten. Austreten von Wasser bei nicht vollständiger Entwässerung möglich • Keine bekannten Schadstoffe
Dauer der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Mind. 3 Jahre
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Umweltgefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> • Trocken und witterungsgeschützt lagern • Bei unvollständiger Entwässerung Lagerung in flüssigkeitsdichten Behältern (evtl. mit Ablass) • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Brandstiftung	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Arbeitssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Schutzausrüstung bereitstellen (Augen- und Atemschutz bei staubenden Tätigkeiten, Handschuhe, Arbeitskleidung) • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Schutz vor Diebstahl	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Art des Zwischenlagers	<ul style="list-style-type: none"> ○ Geschlossene Lagerhalle (Schutz vor Witterung)
Platzbedarf (reine Lagerfläche, ohne Sozialräume Außenflächen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Jahre: ca. 600 m² (Raumhöhe mind. 8 m, Gesamtmenge 2.000 t) (Annahme Lagerung der Behälter, z. B. Fässer auf Paletten in einem Regal mit 4 Ebenen, pro Palette 1.000 kg, 20 % Platz zum

Rangieren)

- Ohne Regal ca. 1.200 m (maximal Last Palette 2.000 kg → 2 Paletten ohne Regal stapelbar, Raumhöhe ca. 5 m)
- 10 Jahre: ca. 1.200 m² (Raumhöhe mind. 8 m, Gesamtmenge 4.000 t)
 - Ohne Regal ca. 2.400 m² (Raumhöhe ca. 5 m)




3.3.6 Indiumhaltige Abfälle: separierte indiumhaltige Glasfraktion

3.3.6.1 Geeigneter Grad der Separation

Die Abtrennung der LC-Displayschichten ist bereits Stand der Technik. Die weitere Zerkleinerung und Abtrennung der Kunststofffraktion zur Gewinnung der indiumhaltigen Glasfraktion wird zumindest teilweise ebenfalls praktiziert.

3.3.6.2 Einlagerungsform

Tabelle 87: Bewertung Einlagerungsform für indiumhaltige Glasfraktion

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Korngröße für Schüttung geeignet (aber: Staubeentwicklung) Potentiell gesundheitsschädlich beim Einatmen Keine Informationen zu einzelnen Teilmengen nötig Für Lagerung in geschlossenen Bunkern geeignet	
In Behältern	Korngröße zur Lagerung in geschlossenen Behältern z. B. Fässern geeignet	

3.3.6.3 Anforderungen an separierte indiumhaltige Glasfraktion für die Zwischenlagerung

Tabelle 88: Anforderungen an separierte indiumhaltige Glasfraktion

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> ● LC-Geräte
Grad der Separation	<ul style="list-style-type: none"> ● Abgetrennte indiumhaltige Glasfraktion (teilweise bereits praktiziert)
Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien	<ul style="list-style-type: none"> ● Gerätebauteile (Gehäuse, Standfuß, Kunst-

lien, Komponenten	stoffe, Kabel, Hintergrundbeleuchtung, etc.)
Vor der Einlagerung zu entfernende Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Nach der Entfernung der Gerätebauteile keine
Mindestkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> Ca. 50 ppm Indium
Zustand bei der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> Aggregatzustand: fest Masse: ca. 0,06 – 1,8 kg Größe: 100 cm² - 10.000 cm² Konditionierung: keine
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Gefahrenpotential: gering Stoffverhalten: unbekannt Indiumzinnoxid verursacht Hautreizungen, Augenreizungen und reizt die Atemwege Kann toxische Substanzen (As, Sb, Pb, Sr) enthalten
Qualitätsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> Unbekannt (noch kein vollständig entwickeltes Verfahren vorhanden)

3.3.6.4 Gestaltung des Zwischenlagers für indiumhaltige Glasfraktion

Tabelle 89: Anforderungen an das Zwischenlager für indiumhaltige Glasfraktion

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> LCD-Geräte
Einlagerungsform	<ul style="list-style-type: none"> Abgetrennte indiumhaltige Glasfraktion
Einstufung	<ul style="list-style-type: none"> I. d. R. nicht gefährlich
Menge pro Jahr	<ul style="list-style-type: none"> Ca. 200 t (Gesamtaufkommen, 2.070 t LCD Display-Schichten, Anteil Glas ca.10 %, ohne Berücksichtigen von Verlusten bei der Sammlung, Aufbereitung, etc.)
Max. tolerierbarer Schadstoffgehalt	<ul style="list-style-type: none"> Unbekannt
Qualitätsanforderungen des Verwertungsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> Unbekannt (noch kein vollständig entwickeltes Verfahren vorhanden)
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> Zusammensetzung: ca. 50 ppm Indium, Glas Gefahrenpotential: gering Stoffverhalten. Freisetzung von Stoffen bei normaler Handhabung nicht zu erwarten Kann toxische Schwermetalle (As, Sb, Pb, Sr) enthalten
Dauer der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> Über ein Jahr
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Umweltgefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> Trocken und witterungsgeschützt lagern Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Brandstiftung	<ul style="list-style-type: none"> Allgemeine Lageranforderungen beachten

	(siehe Kapitel 3.3.1)
Arbeitssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Schutzausrüstung bereitstellen (Augen- und Atemschutz bei staubenden Tätigkeiten, Handschuhe, Arbeitskleidung) • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Schutz vor Diebstahl	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Art des Zwischenlagers	<ul style="list-style-type: none"> • Geschlossene Lagerhalle (Schutz vor Witterung)
Platzbedarf (reine Lagerfläche, ohne Sozialräume Außenflächen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Jahre: ca. 600 m² (Raumhöhe ca. 5 m, Gesamtmenge 1.000 t (Annahme Lagerung (z. B., Fässer) der Behälter auf Paletten max. 2.000 kg, 20 % Platz zum Rangieren) <ul style="list-style-type: none"> ○ Mit Regal: ca. 300 m² (Raumhöhe 8 m, z. B. Fässer auf Paletten in einem Regal mit 4 Ebenen, pro Palette 1.000 kg, 20 % Platz zum Rangieren) • 10 Jahre: ca. 1.200 m² (Raumhöhe mind. 5 m, Gesamtmenge 20.800 t) <ul style="list-style-type: none"> ○ Mit Regal ca. 600 m² (Raumhöhe ca. 5 m)



3.3.7 Leuchtstoffe


3.3.7.1 Geeigneter Grad der Separation

Die Abtrennung des Leuchtstoffpulvers bei der Aufbereitung von Gasentladungslampen, LCD-Anzeigen und CRT-Geräten ist bereits Stand der Technik. Eine weitere Separation vor der Einlagerung ist nicht notwendig.

3.3.7.2 Geeignete Einlagerungsform

Tabelle 90: Bewertung Einlagerungsform für Leuchtstoffe

Separationsgrad	Begründung	Beurteilung
gestapelt	Form zum Stapeln ungeeignet	
geschüttet	Korngröße für Schüttung geeignet (aber: Staubentwicklung) Potentiell gesundheitsschädlich beim Einatmen	

	Keine Informationen zu einzelnen Teilmengen nötig Für Lagerung in geschlossenen Bunkern geeignet	
In Behältern	Korngröße zur Lagerung in geschlossenen Behältern z. B. Fässern geeignet	

Eine Lagerung in Fässern ist zu empfehlen.

3.3.7.3 Anforderungen an Leuchtstoffe für die Zwischenlagerung

Tabelle 91: Anforderungen an Leuchtstoffe für die Zwischenlagerung

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • Leuchtstoffe aus Gasentladungslampen • Leuchtstoffe aus LC-Displays • Leuchtstoffe aus CRT-Geräten
Grad der Separation	<ul style="list-style-type: none"> • Abgetrenntes Leuchtstoffpulver
Vor der Einlagerung zu entfernende Materialien, Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Glas, Quecksilber, Gerätebauteile
Vor der Einlagerung zu entfernende Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Quecksilber
Mindestkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> • 1 % Seltenerdmetalle
Zustand bei der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Aggregatzustand: fest • Masse: pulverförmig • Größe: pulverförmig • Konditionierung: keine
Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahrenpotential: gering • Stoffverhalten: unbekannt • Keine bekannten Schadstoffe
Qualitätsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Unbekannt

3.3.7.4 Gestaltung des Zwischenlagers für Leuchtstoffe

Tabelle 92: Anforderungen an das Zwischenlager für Leuchtstoffe

	Anforderungen
Ausgangsobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • LCD-Geräte, Gasentladungslampen, CRT-Geräte
Einlagerungsform	<ul style="list-style-type: none"> • Abgetrenntes Leuchtstoffpulver
Einstufung	<ul style="list-style-type: none"> • I. d. R. nicht gefährlich
Menge pro Jahr	<ul style="list-style-type: none"> • 130 t (Gesamtaufkommen, Mittelwert aus voraussichtlichem Aufkommen 2020 und 2027 ohne Berücksichtigen von Verlusten bei der Sammlung, Aufbereitung, etc.)
Max. tolerierbarer Schadstoffgehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Unbekannt
Qualitätsanforderungen des Verwertungsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • Unbekannt

Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammensetzung: Wirtsgitter , 10-20 % Seltenerdmetalle • Gefahrenpotential: gering • Stoffverhalten. Freisetzung von Stoffen bei normaler Handhabung nicht zu erwarten • Keine bekannten Schadstoffe
Dauer der Einlagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Mind. 3 Jahre
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Umweltgefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> • Trocken und witterungsgeschützt lagern • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Maßnahmen zur Vorsorge gegen Brandstiftung	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Arbeitssicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • Persönliche Schutzausrüstung bereitstellen (Augen- und Atemschutz bei staubenden Tätigkeiten, Handschuhe, Arbeitskleidung) • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Schutz vor Diebstahl	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Lageranforderungen beachten (siehe Kapitel 3.3.1)
Art des Zwischenlagers	<ul style="list-style-type: none"> • Geschlossene Lagerhalle (Schutz vor Witterung)
Platzbedarf (reine Lagerfläche, ohne Sozialräume Außenflächen etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Jahre: ca. 400 m² (Raumhöhe ca. 5m, Gesamtmenge 650 t) (Annahme Lagerung der Behälter (z. B. Fässer) auf Paletten, max. Last der Palette 2.000 kg, 20 % Platz zum Rangieren) • 10 Jahre: ca. 800 m² (Raumhöhe ca. 5 m, Gesamtmenge 1.300 t)

3.4 Alternativen zur Zwischenlagerung: großtechnisch betriebene Recyclingverfahren im Ausland

Für die untersuchten Abfallströme werden im Folgenden als Alternative zur Zwischenlagerung im Ausland bereits verfügbare großtechnische Behandlungs- und Rückgewinnungsoptionen dargestellt.

3.4.1 NdFeB-Magnete

Hitachi (Japan) hat ein Verfahren entwickelt, mit dem Magnete aus Festplatten und Klimaanlage gewonnen werden können. Diese können weiter zu Seltenerdmetallen oder -oxiden aufbereitet werden. Die Firma SANTOKU hat 2012 in Tsuruga (Japan) eine Anlage zur Rückgewinnung von Neodym und Dysprosium aus Magnetmaterial aus Klimaanlage und Produktionsrückständen in Betrieb genommen. Nach der thermischen Entmagnetisierung wird das Material gemahlen und hydrometallurgisch aufbereitet. Über eine Schmelzsalzelektrolyse werden anschließend die Seltenerdmetalle in metallischer Form gewonnen (Hoogerstrate et al. 2014; S. 64100).

3.4.2 Poliermittel

Minolta hat ein Verfahren entwickelt, durch das mit Hilfe von additiven Fällungsprozessen Ceroxid durch Agglomerationsprozesse aus gebrauchten Polierschlämmen zurückgewonnen wird (Konica Mi-

nolta 2017). Weitere Hinweise auf eine großtechnische Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Poliermitteln liegen nicht vor.

3.4.3 NiMH-Batterien

Honda Motor Co. hat 2013 begonnen, in einer Anlage der Japan Metals & Chemicals Co Seltenerdmetalle oder -oxide aus NiMH-Batterien zu gewinnen. Dafür werden die Batterien nach der Sammlung auseinandergebaut, kalziniert und gemahlen. Das Pulver wird anschließend in verschiedene Fraktionen getrennt. Fraktionen, die Seltenerdmetalle enthalten, werden in Säure gelöst um Seltenerdmetalloxide zu erhalten. Anschließend werden die Seltenerdmetalle über Schmelzsalzelektrolyse in metallischer Form gewonnen. Die erreichten Reinheiten liegen bei über 99 % und damit genauso hoch wie bei der Gewinnung aus Primärquellen. Die Ausbeute an Seltenerdmetallen liegt bei über 80% (Electric Vehicle Research 2013).

3.4.4 Spezialgläser und Keramiken

Hinweise auf eine großtechnische Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus End-of-life Keramiken oder Spezialgläsern liegen nicht vor (Krishnamurthy, Gupta 2015; S. 684).

3.4.5 FCC-Katalysatoren

Hinweise für eine großtechnische Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus FCC Katalysatoren liegen nicht vor.

3.4.6 Kfz-Katalysatoren

Recyclingverfahren für Kfz-Katalysatoren konzentrieren sich auf die Rückgewinnung der Edelmetalle. Cer und Lanthan gehen dabei in die Schlacke über. Es sind derzeit keine großtechnischen Prozesse bekannt, mit denen Cer und Lanthan aus Autokatalysatoren direkt oder aus der Schlacke wiedergewonnen werden (Krishnamurthy, Gupta 2015; S. 684).

3.4.7 Indiumhaltige Abfallströme

Die Rückgewinnung von Indium erfolgt derzeit nur während des Produktionsprozesses von halbfertigen Produkten und Zwischenprodukten. Die Indium-Rückgewinnung im Rahmen des Recyclings von End-of-life LCD Panels wird derzeit nicht großtechnisch durchgeführt (Ueberschaar et al. 2017; S. 3).

3.4.8 Leuchtstoffe

Die Firma Rhodia (heute Solvay) gab 2011 bekannt, ein Verfahren zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Leuchtstoffen entwickelt zu haben mit dem 95 % der Seltenerdmetalle wiedergewonnen werden können. Das Verfahren beruht sowohl auf hydro- als auch pyrometallurgischen Prozessen. Zunächst wird ein Seltenerdmetall-Konzentrat abgetrennt. Dieses kann anschließend in der Seltenerdmetall-Trennanlage in La Rochelle (Frankreich) weiter aufbereitet werden. Bei dem Verfahren wird neben den Seltenerdmetallen auch Phosphorpentoxid wiedergewonnen. Dieses Verfahren wurde in Hochpreisphasen praktiziert, inzwischen ist der Prozess aber aus Wirtschaftlichkeitsgründen eingestellt. Dies ist der einzige großtechnische Prozess zur Rückgewinnung von Seltenerdmetallen aus Leuchtstoffen, zu dem Informationen vorliegen. Außerhalb der EU konnte keine Anlage für die großtechnische Rückgewinnung von Leuchtstoffen identifiziert werden.

3.5 Rechtliche Randbedingungen der Zwischenlagerung

3.5.1 Einleitung

Aufgrund des derzeitigen Standes der Forschung und Entwicklung steht zu erwarten, dass für einige sondermetallhaltige Abfälle mittelfristig großtechnische Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren in Deutschland bzw. Europa zur Verfügung stehen und dann entsprechende Anlagenkapazitäten geschaffen werden. Sofern in Vorschriften zur Produktverantwortung, wie z. B. der WEEE-RL und dem ElektroG, zukünftig die Verwertung von Edel- und Sondermetallen verankert wird, wird aufgrund der fehlenden derzeitigen Verwertungsmöglichkeiten zumindest für einige Sondermetalle eine Zwischenlagerung erforderlich sein. Nachdem in den vorherigen Arbeitsschritten geprüft und konkretisiert wurde, welche Abfallströme zur mehrjährigen Zwischenlagerung in Betracht kommen, sollen im Folgenden die rechtlichen Vorgaben an die Zwischenlagerung von Abfällen auf nationaler und europäischer Ebene beschrieben werden.

Zu beachten ist, dass sich eine Pflicht zur Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Fraktionen nicht aus den derzeitigen Separationspflichten oder Verwertungs- bzw. Recyclingquoten nach ElektroG und AltfahrzeugV ableiten lässt. Dafür müssten konkrete Verwertungspflichten für die sondermetallhaltigen Fraktionen rechtlich festgelegt werden (vgl. dazu bereits unter 2.3).

3.5.2 Rechtliche Würdigung

Nach Darstellung der rechtlichen Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes („KrWG“), der Nachweisverordnung („NachwV“), des Bundes-Immissionsschutzgesetzes („BImSchG“) und der DepV an die Genehmigung einer Zwischenlagerung (3.5.2.1) sowie einer Vertiefung der deponierechtlichen Anforderungen an den Nachweis der Verwertung (3.5.2.2), der Darstellung der Haftung des Betreibers eines Zwischenlagers (3.5.2.3) und der Möglichkeit der Zwischenlagerung von Sondermetallen (aus Abfällen) aus Gründen der Rohstoffsicherung durch Wirtschaftsbeteiligte oder den Staat (3.5.2.4) werden rechtliche Ausgestaltungsmöglichkeiten der Zwischenlagerung erörtert, insbesondere was ihre Finanzierung betrifft (3.5.2.5). Abschließend wird auf die fehlenden stoffstromspezifischen Anordnungs- (3.5.2.6) und Verwertungspflichten (3.5.2.7) für sondermetallhaltige Abfälle hingewiesen.

3.5.2.1 Rechtliche Anforderungen an die Genehmigung der Zwischenlagerung

Die Zwischenlagerung von Abfällen vor der weiteren Entsorgung unterliegt unterschiedlichen abfall-, immissionsschutz- und baurechtlichen Anforderungen. Neben der Unterscheidung der Art und Menge des zwischenzulagernden Abfalls spielt der zeitliche Faktor, d. h. die Dauer der Lagerung, eine entscheidende Rolle.

In Kurzzeitlagern wird der Abfall bis zu einem Jahr gelagert. Dies ergibt sich aus Nr. 8.12 Anhang 1 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung („4. BImSchV“) i. V. m. Nr. 8.14 Anhang 1 4. BImSchV,

vgl. Bilitewski/Härdtle, Abfallwirtschaft, 4. Auflage 2013, S. 291.

Langzeitlager werden in § 2 Nr. 22 DepV demgegenüber definiert als

„Anlagen zur Lagerung von Abfällen nach § 4 Absatz 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes in Verbindung mit Nummer 8.14 des Anhangs 1 zur Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen“.

Nr. 8.14 Anhang 1 4. BImSchV erfasst Anlagen zum Lagern von Abfällen über einen Zeitraum von jeweils mehr als einem Jahr.

Vom Anwendungsbereich der DepV ausgenommen ist jedoch die Lagerung von Abfällen in Langzeitlagern, soweit die Abfälle vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren gelagert werden,

vgl. § 1 Abs. 3 Nr. 5 DepV.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Anforderungen beschrieben

- an die Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. von Abfällen zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr (3.5.2.1.1),
- an die Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als einem, aber weniger als drei Jahren (3.5.2.1.2)
- an die Kurzzeitlagerung von Abfällen über einen Zeitraum von weniger als einem Jahr (3.5.2.1.3).

Tabelle 93 gibt einen Überblick über die Genehmigungsanforderungen für die Lagerung von Abfällen.

Tabelle 93: Überblick über unterschiedliche Genehmigungsanforderungen für die Lagerung von Abfällen

Rechtsbereich	Lagerung von Abfällen ≤ 1 Jahr (= Kurzzeitlagerung)	Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung > 1 Jahr, aber < 3 Jahre	Langzeitlagerung von Abfällen zur Beseitigung > 1 Jahr und zur Verwertung ≥ 3 Jahre	Einrichtung von Zwischenlagern in bestehenden Deponien
Immissionsschutz	Ggf. immissionsschutzrechtliche Genehmigung <ul style="list-style-type: none"> • Erforderlichkeit abhängig von Art und Menge der Abfälle • Nr. 8.12 Anhang 1 4. BImSchV • Konzentrationswirkung der BImSchG-Genehmigung 	Erforderlichkeit einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung <ul style="list-style-type: none"> • 4. BImSchV: Unterschiedliche Genehmigungsverfahren (mit oder ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) abhängig von Art und Menge der Abfälle • Konzentrationswirkung der BImSchG-Genehmigung 	Immissionsschutzrechtliche Genehmigung	
Deponieverordnung	Kein Anwendungsbereich der DepV	Kein Anwendungsbereich der DepV § 1 Abs. 3 Nr. 5 DepV: Vom Anwendungsbereich der DepV ausgenommen ist die Lagerung von Abfällen in Langzeitlagern, soweit die Abfälle vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren gelagert werden	Anwendungsbereich der DepV <ul style="list-style-type: none"> • Langzeitlager: Anlagen zum Lagern von Abfällen über einen Zeitraum von jeweils > 1 Jahr (§ 2 Nr. 22 DepV, Nr. 8.14 Anhang 1 4. BImSchV) • Ausnahme: § 1 Abs. 3 Nr. 5 DepV (Lagerung von Abfällen in Langzeitlagern, soweit Lagerung von Abfällen vor der Verwertung < 3 Jahre) Anforderungen der DepV <ul style="list-style-type: none"> • §§ 23, 24 DepV und allg. Anforderungen Insbesondere § 23 Abs. 1 Satz 2 DepV (schriftlicher Nachweis der nachfolgenden Entsorgung)	Anforderungen der DepV §§ 23, 24 DepV und allg. Anforderungen
Wasser- und Bau-recht	Ggf. bau- und wasserrechtliche Genehmigung			
Kreislaufwirtschafts-gesetz				Planfeststellung oder -genehmigung nach KrWG <ul style="list-style-type: none"> • Deponien bedürfen nach § 35 Abs. 2 bis 5 KrWG der abfallrechtlichen Planfeststellung oder -genehmigung • Zwischenlager sind keine

			<p>Deponien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einrichtung des Zwischenlagers kann eine wesentliche Änderung eines bestehenden Deponiebetriebs darstellen mit der Folge, dass existierende Planfeststellungsbeschlüsse bzw. -genehmigungen ggf. geändert werden müssen
--	--	--	---

3.5.2.1.1 Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. Langzeitlagerung von Abfällen zur Beseitigung von mehr als einem Jahr

An die Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. die Langzeitlagerung von Abfällen zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr werden die höchsten Anforderungen gestellt, die im Folgenden dargestellt werden.

3.5.2.1.1.1 KrWG

Die Errichtung und der Betrieb von Abfallentsorgungsanlagen, zu denen auch Zwischenlager von Abfällen gehören, bedürfen nach § 35 Abs. 1 KrWG einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung. Einer weiteren Zulassung nach dem KrWG bedarf ein Zwischenlager demgegenüber regelmäßig nicht,

vgl. Beckmann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht KrWG, Stand: Juli 2018, § 35 Rdn. 16 ff.; Klages, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht KrWG, Stand: April 2018, § 35 Rdn. 15, 22; Häberle, in: Erbs/Kohlhaas, Strafrechtliche Nebengesetze KrWG, Stand: Juli 2018, § 35 Rdn. 1 f.

Dies ergibt sich aus folgenden Erwägungen: Lediglich Deponien bedürfen nach § 35 Abs. 2 bis 5 KrWG einer abfallrechtlichen Planfeststellung oder -genehmigung. Unter den Deponiebegriff des § 3 Abs. 27 KrWG fallen Langzeitlager im Sinne des § 2 Nr. 22 DepV jedoch nicht,

vgl. Resse/Klages, in: Jarass/Petersen, Kommentar, 2014, § 3 Rdn. 349; Fellenberg/Schiller, ebenda, § 35 Rdn. 1.

Der Vollständigkeit halber wird ergänzend darauf hingewiesen, dass eine abfallrechtliche Planfeststellung oder -genehmigung erforderlich sein kann, soweit ein Zwischenlager im Zusammenhang mit einem bestehenden (abfallrechtlich bereits planfestgestellten oder -genehmigten) Deponiebetrieb eingerichtet werden soll. In diesem Zuge kann die Einrichtung des Zwischenlagers eine wesentliche Änderung des bestehenden Deponiebetriebs darstellen mit der Folge, dass existierende Planfeststellungsbeschlüsse bzw. -genehmigungen ggf. geändert werden müssen. Verfahrens- sowie materiellrechtliche Anforderungen an den Betrieb eines Langzeitlagers von Abfällen als Teil einer bereits planfestgestellten oder -genehmigten Deponie ergeben sich in diesem Fall aus § 35 ff. KrWG,

vgl. dazu OVG Münster, Urteil vom 30.04.2010, 20 D 119/07, BeckRS 2010, 50691; vgl. BVerwG, Urteil vom 21.08.1996, 11 C 9/95, NVwZ 1997, 161 (161 ff.); Klages, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht KrWG, Stand: April 2018, § 35 Rdn. 27; BMUB, Begründung zur zweiten Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung vom 14.11.2012, S. 16, vgl. hierzu kritisch: Franßen, AbfallR 2004, 268 (272); Petersen/Krohn, Abfallrecht 2014, 103 (105).

Unabhängig davon unterliegt der Betreiber eines Zwischenlagers von Abfällen nicht nur den abfallrechtlichen Pflichten des Abfallbesitzers, sondern auch den abfallrechtlichen Pflichten des Abfallentsorgers, zu denen beispielsweise die Einhaltung der Nachweisverordnung gehört,

vgl. zur NachwV sogleich im Detail unter 3.5.2.1.1.2, vgl. zum Betreiberbegriff im Detail unter 3.5.2.5.1 sowie zur Haftung des Abfallbesitzers im Detail unter 3.5.2.3.

3.5.2.1.1.2 NachwV

Im Rahmen der Erfüllung der abfallrechtlichen Nachweisführung treten bei Zwischenlagern Besonderheiten auf. Soweit im Rahmen der NachwV die behördliche Bestätigung der zulässigen Entsorgung durch die für die Entsorgungsanlage zuständige Behörde erforderlich sein sollte,

vgl. § 5 NachwV – diese Pflicht zur Einholung einer solchen Bestätigung kann allerdings nach § 7 NachwV entfallen –

ist zu beachten, dass bei einer ausschließlichen Zwischenlagerung von Abfällen die Bestätigung eines in einer solchen Anlage endenden Entsorgungsnachweises nicht zulässig ist. Nach § 5 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 NachwV darf die für die Entsorgungsanlage (also das Zwischenlager) zuständige Behörde die Zulässigkeit der vorgesehenen Entsorgung (also die Zwischenlagerung) nur bestätigen, wenn die weitere Entsorgung nach der Zwischenlagerung bereits durch mindestens einen Entsorgungsnachweis festgelegt ist. Hintergrund dieser Regelung ist, dass verhindert werden soll, dass Abfälle wiederholt von einem in ein anderes Zwischenlager verschoben werden. Stattdessen wird mindestens ein über die Zwischenlagerung hinausgehender substanzieller Entsorgungsschritt verlangt (z. B. eine physikalische Behandlung). Die weitere Entsorgung ist zumindest dann im Sinne von § 5 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 NachwV durch entsprechende Entsorgungsnachweise gesichert, wenn der nachgewiesene Entsorgungsweg zu einem Entsorgungsverfahren R1 bis R12 oder D1 bis D14 führt und die Rückverfolgbarkeit von der Erzeugung bis zum endgültigen Bestimmungsort gewahrt bleibt,

vgl. LAGA M 27, S. 39.

Im Rahmen der NachwV ist es jedoch bereits jetzt zulässig und in der Praxis üblich, die spätere Entsorgung von Abfällen aus dem Zwischenlager auch auf der Grundlage von Ausgangs-Entsorgungsnachweisen vorzunehmen, die bei der Erbringung des Entsorgungsnachweises für das Zwischenlager noch nicht vorgelegen haben,

vgl. LAGA M 27, S. 38.

Prinzipiell ist es im Rahmen der NachwV daher möglich, nicht die bei der Bestätigung angezeigten Entsorgungswege (z. B. über eine anschließende Beseitigung nach der Zwischenlagerung) zu nutzen, sondern andere Verwertungswege.

Für die vorliegenden edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme bedeutet dies, dass es für die Erteilung der behördlichen Bestätigung der zulässigen Entsorgung ausreichend ist, wenn der Zwischenlagerbetreiber nachweisen kann, dass er über ausreichende Entsorgungsmöglichkeiten im Output verfügt. Dazu reicht auch der Nachweis der nachfolgenden Beseitigung aus. Sollten sich während der Dauer der Zwischenlagerung neue Verwertungsmöglichkeiten ergeben, ist der Zwischenlagerbetreiber nach der NachwV nicht an die zu Beginn der Zwischenlagerung an die zuständige Behörde mitgeteilte Entsorgungsmöglichkeit gebunden. Vielmehr kann er auch andere Entsorgungsmöglichkeiten (z. B. neu erbaute Verwertungsanlagen) nutzen.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine Änderung der abfallrechtlichen Vorschriften, insbesondere der NachwV, nicht erforderlich, um eine Zwischenlagerung von edel- und sondermetallhaltigen Abfallströmen zu gewährleisten.

Ergänzend soll hervorgehoben werden, dass für die edel- und sondermetallhaltigen Bauteile, die im Rahmen der Erstbehandlung aus einem Elektro- oder Elektronikgerät ausgebaut wurden, die Pflichten der NachwV eingreifen. Dies ergibt sich aus folgenden Erwägungen:

Zwar gibt es nach § 2 Abs. 3 Satz 4 ElektroG keine Nachweispflichten bei der Überlassung von gefährlichen Abfällen nach § 50 Abs. 1 KrWG an Einrichtungen zur Sammlung und Rücknahme von Altgeräten (Erfassung) sowie Einrichtungen zur Erstbehandlung,

vgl. noch mit Bezug auf § 43 KrW-/AbfG: LAGA, 27. Mitteilung – Vollzugshilfe zum abfallrechtlichen Nachweisverfahren, 2009, Rdn. 443 ff.; LAGA, Mitteilung 31 A – Umsetzung des Elektro- und Elektronikgesetzes, 2017, S. 113.

Diese Ausnahme von der Nachweispflicht endet aber ab der Erstbehandlungsanlage,

vgl. LAGA, Mitteilung 31 A – Umsetzung des Elektro- und Elektronikgesetzes, 2017, S. 114.

Klarzustellen ist ferner, dass es sich bei dieser Ausnahme von der Nachweispflicht um die Nachweispflicht im Sinne der NachwV handelt und nicht um die Nachweispflicht der gesicherten und schadlosen Verwertung bzw. gemeinwohlverträglichen Beseitigung des § 23 Abs. 1 Satz 2 DepV. Von der Ausnahme unberührt bleibt ferner die Pflicht des Abfallbeförderers zur Mitführung von Unterlagen nach § 16b NachwV bei allen Transporten von Elektro- und Elektronikaltgeräten,

vgl. § 16b NachwV; LAGA, Mitteilung 31 A – Umsetzung des Elektro- und Elektronikgesetzes, 2017, S. 114.

Ab der Erstbehandlungsanlage greifen daher die Nachweispflichten der NachwV auch im Hinblick auf edel- und sondermetallhaltigen Bauteile, die aus einem Elektro- oder Elektronikgerät ausgebaut wurden.

3.5.2.1.1.3 Keine besonderen Anforderungen an die Zwischenlagerung von ausgebauten edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten

Zu prüfen ist ferner, ob die Zwischenlagerung von ausgebauten edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen noch den Vorschriften des ElektroG unterliegt. In § 20 Abs. 2 Satz 4, Anhang 5 Nr. 1 ElektroG werden technische Anforderungen an Standorte für die Zwischenlagerung von Elektro- und Elektronikaltgeräten vor der weiteren Behandlung festgelegt, die bei der Genehmigung von Kurz- und Langzeitlagern zu berücksichtigen sind.

Nach Anhang 5 Nr. 1 ElektroG sind demnach für die Zwischenlagerung dieser Altgeräte

- „a) geeignete Bereiche mit undurchlässiger Oberfläche und Auffangeinrichtungen mit gegebenenfalls Abscheidern für auslaufende Flüssigkeiten und fettlösende Reinigungsmittel,
- b) geeignete Bereiche mit wetterbeständiger Abdeckung“

an den entsprechenden Lagerstandorten bereitzuhalten. Die Deponieverordnung findet neben den besonderen technischen Anforderungen an die Zwischenlager nach Anhang 5 ElektroG weiterhin Anwendung,

vgl. Anhang 5 Nr. 1 ElektroG.

Zu beachten ist jedoch, dass die Pflicht des § 20 Abs. 2 Satz 4, Anhangs 5 Nr. 1 ElektroG sich bereits ihrem Wortlaut nach nur auf „Altgeräte“ bezieht und nicht zusätzliche „Bauteile“ von Altgeräten erwähnt. Dies spricht bereits dagegen, diese Anforderungen auch auf aus Altgeräten ausgebaute Bauteile zu erstrecken. Systematische Erwägungen bestätigen dies, da in anderen Vorschriften des ElektroG explizit auf Bauteile von Altgeräten Bezug genommen wird,

vgl. § 16 Abs. 2 § 20 Abs. 1 Satz 1, § 22 Abs. 3 Satz 1 ElektroG.

Dies steht ferner in Übereinstimmung mit Anhang VIII der WEEE-RL, der ebenfalls nur auf Elektro- und Elektronik-Altgeräte Bezug nimmt. Schließlich wird durch die Anforderung der DepV bzw. der übrigen oben dargestellten immissionsschutz- oder abfallrechtlichen Vorschriften an die Zwischenla-

gerung dieser ausgebauten Bauteile sichergestellt, dass Umwelt und Mensch ausreichend geschützt sind.

Vor diesem Hintergrund muss die Zwischenlagerung der edel- und sondermetallhaltigen Bauteile, die bereits aus den Elektro- und Elektronikgeräten ausgebaut wurden, nicht die Anforderungen des § 20 Abs. 2 Satz 4, Anhang 5 Nr. 1 ElektroG erfüllen.

3.5.2.1.1.4 BImSchG

Bei der Verweisung des § 35 Abs. 1 KrWG in das Bundes-Immissionsschutzgesetz handelt es sich um eine Rechtsgrundverweisung. Die Reichweite des Genehmigungsvorbehalts für Langzeitlager richtet sich daher nach dem BImSchG,

vgl. Fellenberg/Schiller, in: Jarass/Petersen, Kommentar, 2014, § 35 Rdn. 11; Beckmann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht KrWG, Stand: Juli 2018, § 35 Rdn. 16; Klages, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht KrWG, Stand: Oktober 2018, § 35 Rdn. 15.

Die Errichtung und der Betrieb von ortsfesten Abfallentsorgungsanlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen bedürfen nach § 4 Abs. 1 Satz 1 BImSchG einer Genehmigung. Unter Lagern im Sinne des BImSchG fällt sowohl die Kurz- als auch die Langzeitlagerung, aber nicht die endgültige Ablagerung. Für alle Langzeitlager von Abfällen sind insbesondere die Anforderungen der 4. BImSchV sowie der DepV zu beachten.

vgl. Dietlein, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 4 Rdn. 37.

3.5.2.1.1.4.1 Genehmigungsbedürftigkeit und -verfahren

Maßgeblich für die Reichweite des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsvorbehalts ist der Katalog des Anhangs der 4. BImSchV, in dem auch die Genehmigungsbedürftigkeit von Anlagen zur Langzeitlagerung geregelt ist,

vgl. Beckmann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht KrWG, Stand: Juli 2018, § 44 Rdn. 24.

Gemäß Nr. 8.14 4. BImSchV bedürfen alle Anlagen zur Zwischenlagerung von Abfällen über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, lediglich die Genehmigungsverfahren unterscheiden sich, wie folgt:

- Anlagen mit einer Gesamtlagerkapazität von über 50 Tonnen, soweit die Lagerung untertägig erfolgt (= Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG),
- Anlagen mit einer Aufnahmekapazität von 10 Tonnen oder mehr je Tag (= Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG),
- Anlagen mit einer Gesamtlagerkapazität von 25.000 Tonnen oder mehr (= Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG).

Für Anlagen mit einer Aufnahmekapazität von weniger als 10 Tonnen je Tag regelt die 4. BImSchV die folgenden Verfahren abhängig von der Gesamtlagerkapazität:

- Von weniger als 25.000 Tonnen, soweit es sich um gefährliche Abfälle handelt (= Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG),
- von 150 Tonnen bis weniger als 25.000 Tonnen, soweit es sich um nicht gefährliche Abfälle handelt (= Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG),
- von weniger als 150 Tonnen, soweit es sich um nicht gefährliche Abfälle handelt (= vereinfachtes Verfahren nach § 19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung).

Bei einer Gesamtlagerkapazität für gefährliche Abfälle von 50 Tonnen oder mehr bestehen, soweit die Lagerung untertägig erfolgt, zudem erweiterte Pflichten nach der Industrie-Emissionsrichtlinie 2010/75/EU („IED“), die insbesondere zur Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes (Boden/Grundwasser), der Einhaltung der BVT-Schlussfolgerungen zur Emissionsminderung sowie zur regelmäßigen und systematischen Überwachung der jeweiligen Anlage verpflichtet. Das Gleiche gilt für Anlagen mit einer Aufnahmekapazität von 10 Tonnen oder mehr je Tag und einer Gesamtlagerkapazität von 25.000 Tonnen oder mehr, soweit es sich um andere Abfälle als Inertabfälle handelt.

Ergänzend wird bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für Anlagen zur Zwischenlagerung von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen auch eine Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung („UVP“) existieren kann. Dies richtet sich nach § 4 ff. i. V. m. Anhang 1 UVPG. Für Langzeitlager zum Lagern von Abfällen über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr ist die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung in Anhang 1 unter Nr. 8.9 UVPG geregelt. Anhang 1 sieht für die vorliegend relevanten Anlagen folgende Verfahren vor:

- Die Errichtung und der Betrieb von Langzeitlagern für gefährliche Abfälle mit einer Aufnahmekapazität von mindestens 10 Tonnen/Tag oder einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 150 Tonnen sind generell UVP-pflichtig nach Nr. 8.9.1.1 Anhang 1 UVPG.
- Für alle übrigen Langzeitlager zur Lagerung von gefährlichen Abfällen sowie für alle Langzeitlager für nicht gefährliche Abfälle mit einer Aufnahmekapazität von mindestens 10 Tonnen/Tag bzw. einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 150 Tonnen gilt, dass die UVP-Pflichtigkeit abhängig von einer allgemeinen Vorprüfung des Einzelfalls nach § 7 Abs. 1 Satz 1 UVPG ist (Nr. 8.9.1.2 und 8.9.2.1 Anhang 1 UVPG).
- Für Langzeitlager für alle nicht gefährlichen Abfälle mit geringeren Kapazitäten kann sich nach Nr. 8.9.2.2 Anhang 1 UVPG eine UVP-Pflichtigkeit aus einer standortbezogenen Vorprüfung des Einzelfalls nach § 7 Abs. 2 Satz 1 UVPG ergeben.

3.5.2.1.1.4.2 Genehmigungsvoraussetzungen des BImSchG

Die beantragte Genehmigung für ein Zwischenlager ist zu erteilen, sofern die formellen und materiellen Voraussetzungen von § 6 BImSchG erfüllt sind,

vgl. Schink, NVwZ 2017, 337 (339); Jarass, in: Jarass, BImSchG, 12. Auflage, § 6 Rdn. 42; BVerwG, Urteil vom 24.11.1994, 7 C 25/93, NVwZ 1995, 598 (598).

Die immissionsschutzrechtliche Genehmigung ist nach § 6 BImSchG zu erteilen, wenn sichergestellt ist, dass die sich aus § 5 BImSchG und einer auf Grund des § 7 BImSchG erlassenen Rechtsverordnung ergebenden Pflichten erfüllt werden, und andere öffentlich-rechtliche Vorschriften und Belange des Arbeitsschutzes der Errichtung und dem Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen,

vgl. Enders, in: Giersberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 6 vor Rdn. 1; Jarass, in: Jarass, BImSchG, 12. Aufl., § 6 Rdn. 7; Schmidt-Kötters, in: Giersberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Dezember 2017, § 4 Rdn. 130.

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind nach § 5 Abs. 1 BImSchG so zu errichten und zu betreiben, dass zur Gewährleistung eines hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt

- schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können;
- Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen getroffen wird, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen;

- Abfälle vermieden, nicht zu vermeidende Abfälle verwertet und nicht zu verwertende Abfälle ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden; Abfälle sind nicht zu vermeiden, soweit die Vermeidung technisch nicht möglich oder nicht zumutbar ist; die Vermeidung ist unzulässig, soweit sie zu nachteiligeren Umweltauswirkungen führt als die Verwertung; die Verwertung und Beseitigung von Abfällen erfolgt nach den Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und den sonstigen für die Abfälle geltenden Vorschriften.

Ferner sind genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 5 Abs. 3 BImSchG so zu errichten, zu betreiben und stillzulegen, dass auch nach einer Betriebseinstellung

- von der Anlage oder dem Anlagengrundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden können,
- vorhandene Abfälle ordnungsgemäß und schadlos verwertet oder ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit beseitigt werden und
- die Wiederherstellung eines ordnungsgemäßen Zustandes des Anlagengrundstücks gewährleistet ist.

Die Genehmigungsbehörde prüft im Rahmen des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens beispielsweise bauplanungs-, bauordnungs-, naturschutz-, wasser-, raumordnungs- und landesplanungsrechtliche anlagenbezogene Aspekte,

vgl. Enders, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 6 Rdn. 14, 19 ff.; VG Frankfurt (Oder), Urteil vom 04.11.2010, 5 K 213/07, juris, Rdn. 57 ff.

3.5.2.1.1.5 DepV

Für die Langzeitlagerung sind diese allgemeinen Anforderungen in der Deponieverordnung konkretisiert,

vgl. § 7 Abs. 4 Satz 2 BImSchG.

§§ 23, 24 DepV enthalten Anforderungen an Langzeitlager, u. a. für deren Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachsorge,

vgl. § 1 Abs. 1 Nr. 5, 6 DepV.

Die Erstreckung der deponierechtlichen Anforderungen auf Langzeitlager erfolgte, um die Vorgaben der auch für Langzeitlager geltenden Deponierichtlinie umzusetzen,

vgl. Fellenberg/Schiller, in: Jarass/Petersen, KrWG, Kommentar, 2014, § 35 Rdn. 62.

§ 23 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 DepV erklären einen Teil der Anforderungen, die für die Errichtung und den Betrieb von Deponien gelten, auch für die Langzeitlager für anwendbar. Dies betrifft insbesondere die Anforderungen an die Errichtung, die Organisation, die Inbetriebnahme, die Voraussetzungen für die Ablagerung, die nicht zugelassenen Abfälle, das Annahmeverfahren, die Handhabung der Abfälle und die Maßnahmen zur Kontrolle sowie die Informations- und Dokumentationspflichten des Betreibers,

vgl. zum Nachweis der Entsorgung nach der DepV sogleich unter 3.5.2.2.

Ferner müssen Betreiber von Langzeitlagern – zusätzlich zu der handelsrechtlichen Pflicht zur Bildung ausreichender Rückstellungen – ähnlich wie Betreiber von Deponien Sicherheitsleistungen stellen,

vgl. §§ 18 Abs. 1 Satz 1, 23 Abs. 1 Satz 3 DepV; vgl. zur handelsrechtlichen Rückstellungspflicht § 249 Abs. 1 Satz 1 HGB; vgl. zur Bildung von handelsrechtlichen Rückstellungen für deponie-

rechtliche Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen FG Münster, Urteil vom 25.02.2015 , 9 K 147/11 K,G,F, juris Rdn. 46.

Nach § 23 Abs. 1 Satz 3 DepV ist zu beachten,

„dass für die Berechnung der Höhe der Sicherheit kein Nachsorgezeitraum berücksichtigt wird, sondern die Kosten für die umweltverträgliche Entsorgung der maximal zugelassenen Lagermenge und die Kosten der Wiederherrichtung des Anlagengeländes rechnerisch erfasst sind.“

Folglich setzt sich die Höhe der zu leistenden Sicherheit zusammen aus dem Betrag, der für eine umweltverträgliche Entsorgung der maximal zugelassenen Lagermenge erforderlich ist, und den Kosten, die für die Wiederherstellung des Anlagengeländes anfallen.

Bei der Ermittlung der Höhe der erforderlichen Entsorgungskosten dürfen die dafür erforderlichen Transportkosten zur nächsten Verwertungs- oder Beseitigungsanlage oder zu dem Abnehmer der Abfälle berücksichtigt werden,

vgl. zur Sicherheitsleistung im Rahmen des BImSchG: OVG Lüneburg, Urteil vom 16.11.2009, 12 LB 344/07, juris, Rdn. 43.

Die Höhe der Sicherheit muss das tatsächliche Risiko der öffentlichen Hand widerspiegeln. Eine Erhöhung der Sicherheit über den tatsächlich zu erwartenden Bedarf hinaus zur Absicherung mittels eines „Puffers“ ist nicht zulässig,

vgl. zur Sicherheitsleistung im Rahmen des BImSchG: Grete/Küster, NuR 2002, 467 (470); Diekmann, UPR 2010, 178 (179).

Nach § 18 Abs. 1 Satz 1 DepV ist die Leistung einer Sicherheit obligatorisch,

vgl. BVerwG, Urteil vom 13.03.2008, 7 C 44.07, UPR 2008, 318 (319 f.).

§ 18 Abs. 4 DepV sieht allerdings in der Regel eine Ausnahme von der Pflicht zur Leistung einer Sicherheit für die Fälle vor, in denen das Langzeitlager durch

„eine öffentlich-rechtliche Körperschaft, ein[en] Eigenbetrieb oder eine Eigengesellschaft einer öffentlich-rechtlichen Körperschaft, ein[en] Zweckverband oder eine Anstalt des öffentlichen Rechts“

betrieben wird und eine Einstandspflicht von Bund, Ländern oder Kommunen den Sicherungszweck stellvertretend erfüllt. An dieser Stelle wird deutlich, dass der Gesetzgeber davon ausgeht, dass als Betreiber eines Langzeitlagers nicht nur private Unternehmen, sondern auch öffentliche Betreiber in Betracht kommen,

vgl. zum Betreiberbegriff im Detail unter 3.5.2.3.

3.5.2.1.2 Langzeitlagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von über einem Jahr, aber weniger als drei Jahren

Im Folgenden werden die Anforderungen, die an die Langzeitlagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von über einem Jahr, aber weniger als drei Jahren gestellt werden, dargestellt.

3.5.2.1.2.1 DepV

Der Anwendungsbereich der DepV ist nach § 1 Abs. 3 Nr. 5 DepV nicht für Abfälle eröffnet, die vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren gelagert werden.

Dementsprechend gelten weder die deponierechtliche Nachweispflicht noch die übrigen deponierechtlichen Pflichten unmittelbar, soweit die Lagerdauer von drei Jahren nicht überschritten wird.

3.5.2.1.2.2 Anforderungen nach BImSchG

Da die DepV für die Lagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren keine Regelungen trifft und damit die allgemeinen Genehmigungsanforderungen des BImSchG nicht konkretisiert, gelten lediglich die allgemeinen immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsvoraussetzungen,

vgl. dazu bereits oben unter 3.5.2.1.1.3; vgl. zum KrWG und zur NachwV bereits unter 3.5.2.1.1.1 und 3.5.2.1.1.2.

In diesem Rahmen muss die zuständige Behörde u. a. prüfen, inwieweit sichergestellt ist, dass angenommene Abfälle im Anschluss an die Zwischenlagerung ordnungsgemäß entsorgt werden. Dazu wird die Behörde regelmäßig Nachweise über die anschließende Entsorgung vom Betreiber des Zwischenlagers verlangen. Detaillierte Anforderungen an die Nachweise enthält das BImSchG nicht, so dass gesetzliche Änderungen nicht zwingend erforderlich sind,

vgl. dazu im Detail unter 3.5.2.2.7.

3.5.2.1.2.3 Sicherheitsleistung

Da die DepV für die Lagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren nicht eingreift, resultiert die Notwendigkeit einer Sicherheitsleistung nicht aus der DepV, sondern unmittelbar aus dem BImSchG.

Für die Langzeitlager von Abfällen zur Verwertung mit einer Lagerdauer über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren greift § 12 Abs. 1 Satz 2 BImSchG ein, welcher zur Sicherstellung der in § 5 Abs. 3 BImSchG genannten Anforderungen bei Abfallentsorgungsanlagen i. S. d. § 4 Abs. 1 Satz 1 BImSchG dem Betreiber ebenfalls eine Sicherheitsleistung auferlegt. Die Vorschrift ist als sogenannte „Soll-Vorschrift“ ausgestaltet, so dass die Auferlegung einer Sicherheitsleistung den Regelfall darstellt aus Umweltschutzgründen und zur Bewahrung der öffentlichen Kassen vor erheblichen Sicherungs-, Sanierungs- und Entsorgungslasten,

vgl. Mann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 12 Rdn. 38, 75, 79; Giesberts, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 12 Rdn. 19; Jarass, in: Jarass, BImSchG, 12. Aufl., § 12 Rdn. 21, 28; BT-Drs. 16/13301 (Unterrichtung durch die Bundesregierung), S. 7; BT-Drs. 14/4599 (Gesetzesentwurf), S. 128 f.; kritisch hierzu VGH Kassel, Urteil vom 09.05.2007, 6 UE 42/06, ZUR 2007, 485 (485 f.), wonach die Auferlegung einer Sicherheitsleistung dem Grunde und der Höhe nach eine Ermessensentscheidung und nur bei besonderer Veranlassung vorzunehmen sei.

Demnach hat die Behörde hinsichtlich der Auferlegung der Sicherheit im Gegensatz zu der Langzeitlagerung von Abfällen einen Ermessensspielraum. Dieser Ermessensspielraum ist jedoch nahezu auf „Null“ reduziert, so dass nur in atypischen Einzelfällen von der Sicherung Abstand genommen werden soll. Insbesondere bedarf es keiner Zweifel an der Solvenz des Anlagenbetreibers, sondern es genügt das allgemein latent vorhandene Liquiditätsrisiko als Begründung. Eines konkreten Anlasses für die Forderung einer Sicherheitsleistung bedarf es ebenso nicht,

vgl. BVerwG, Urteil vom 13.03.2008, 7 C 44.07, UPR 2008, 318 (318 ff.); Diekmann, UPR 2010, 178 (178 ff.).

Auch durch die Vorlage eines ordnungsgemäßen Verwertungskonzeptes kann die Sicherheitsleistung nicht abgewendet werden,

vgl. BVerwG, Urteil vom 13.03.2008, 7 C 44.07, UPR 2008, 318 (319).

Die Art der Sicherheitsleistung richtet sich nach § 232 BGB. Zudem kann § 18 Abs. 2 DepV als Orientierung herangezogen werden,

vgl. Mann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 12 Rdn. 82.

3.5.2.1.2.4 *Zwischenergebnis*

Soweit es sich um die Lagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als einem, aber weniger als drei Jahren handelt, ist kein zwingender gesetzlicher Handlungsbedarf ersichtlich.

3.5.2.1.3 **Lagerung von Abfällen für einen Zeitraum von weniger als einem Jahr**

Abschließend werden die rechtlichen Anforderungen an die Kurzzeitlager (Lagerung für einen Zeitraum von weniger als einem Jahr) dargestellt.

3.5.2.1.3.1 *KrWG*

Im Hinblick auf das KrWG und die NachwV greifen die gleichen Anforderungen ein wie für die Langzeitlagerung,

vgl. oben unter 3.5.2.1.1.1. und 3.5.2.1.1.2.

Einer abfallrechtlichen Genehmigung für Kurzzeitlager bedarf es insbesondere auch dann nicht, wenn das BImSchG aufgrund des geringen Beeinträchtigungspotentials keine Genehmigungspflicht vorsehen sollte,

Fellenberg/Schiller, in: Jarass/Petersen, Kommentar, 2014, § 35 Rdn. 15.

3.5.2.1.3.2 *DepV*

Für die Lagerung von Abfällen für einen Zeitraum von weniger als einem Jahr greifen die deponierechtlichen Anforderungen nicht ein,

vgl. § 2 Nr. 19 DepV.

3.5.2.1.3.3 *BImSchG*

Die immissionsschutzrechtlichen Genehmigungserfordernisse ergeben sich für Kurzzeitlager ebenfalls aus dem Katalog des Anhangs der 4. BImSchV.

Zwar sieht § 1 Abs. 1 Satz 1 4. BImSchV grundsätzlich nur eine Genehmigungspflicht für Anlagen i. S. d. Anhang 1 4. BImSchV vor, wenn diese länger als ein Jahr betrieben werden. Dies gilt jedoch nicht für Kurzzeitlager, in denen Abfälle weniger als ein Jahr gelagert werden,

§ 1 Abs. 1 Satz 2 4. BImSchV i. V. m. Nr. 8.12 des Anhangs 1 der 4. BImSchV; vgl. Hansmann/Röckinghausen, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht 4. BImSchV, Stand: April 2018, § 1 Rdn. 8; zur Begründung siehe: Drs.-BT 14/4926 (Gesetzesentwurf), S. 6.

Gemäß Nr. 8.12 des Anhangs 1 der 4. BImSchV bedürfen diese Kurzzeitlager für Abfälle (für eine Dauer von weniger als einem Jahr) einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, wenn es sich um für Anlagen mit einer Gesamtlagerkapazität handelt

- ab 30 Tonnen gefährlicher Abfälle (= ab 50 t Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG und IE-Anlage, ansonsten vereinfachtes Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung), Nr. 8.12.1. der 4. BImSchV;
- ab 100 Tonnen nicht gefährlicher Abfälle (vereinfachtes Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung), Nr. 8.12.2 der 4. BImSchV;
- für Eisen- und Nichteisenschrotten einschließlich Autowracks mit einer Gesamtlagerfläche ab 1.000 Quadratmetern oder Gesamtlagerkapazität ab 100 Tonnen (ab Gesamtlagerfläche ab 15.000 Quadratmetern oder Gesamtlagerkapazität ab 1.500 Tonnen: Genehmigungsverfahren mit Öffent-

lichkeitsbeteiligung nach § 10 BImSchG, ansonsten vereinfachtes Verfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung), Nr. 8.12.3 der 4. BImSchV.

Soweit diese Grenzen nicht überschritten werden, sind die Kurzzeitlager nicht immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig.

Die UVP-Pflichtigkeit für Kurzzeitlager ist ferner in Nr. 8.7 Anhang 1 UVPG geregelt. Demnach gelten folgende Verfahren:

- Für die Kurzzeitlagerung von Eisen- und Nichteisenschrott inklusive der Autowracks von mindestens 1.500 Tonnen Gesamtlagerkapazität nach Nr. 8.7.1.1 Anhang 1 UVPG und von gefährlichen Schlämmen mit einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 50 Tonnen nach Nr. 8.7.2.1 Anhang 1 UVPG hängt die UVP-Pflichtigkeit von einer allgemeinen Vorprüfung des Einzelfalls nach § 7 Abs. 1 Satz 1 UVPG ab.
- Für Kurzzeitlager mit einer Gesamtlagerkapazität von mehr als 100, aber weniger als 1.500 Tonnen Eisen- bzw. Nichteisenschrotte inklusive der Autowracks richtet sich die Notwendigkeit einer UVP-Pflichtigkeit nach Nr. 8.7.1.2 Anhang 1 UVPG nach einer standortbezogenen Vorprüfung des Einzelfalls nach § 7 Abs. 2 Satz 1 UVPG. Dasselbe gilt nach Nr. 8.7.2.2 Anhang 1 UVPG für Kurzzeitlager mit einer Gesamtlagerkapazität von mehr als 30, aber weniger als 50 Tonnen gefährlicher Klärschlämme.

Für die Kurzzeitlager, die danach einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedürfen, gelten die bereits dargestellten Anforderungen der §§ 5 ff. BImSchG,

vgl. dazu bereits unter 3.5.2.1.2.2 und 3.5.2.1.1.3; vgl. zu § 22 BImSchG sogleich unter 3.5.2.1.3.4.

Es ist davon auszugehen, dass die Behörden bei der Kurzzeitlagerung von Abfällen keine höheren Anforderungen an den Nachweis der Entsorgung stellen werden als bei Langzeitlagern, die in den Anwendungsbereich der DepV fallen, gesetzlicher Änderungsbedarf ist daher nicht ersichtlich,

vgl. dazu unten unter 3.5.2.2.7.

3.5.2.1.3.4 Baurecht

Soweit die Zwischenlager die Schwellenwerte der 4. BImSchV nicht überschreiten, werden für sie regelmäßig Baugenehmigungspflichten eingreifen, sofern bauliche Anlagen vorliegen sollten. Im Rahmen der Erteilung der baurechtlichen Genehmigung sind u. a. die §§ 22 ff. BImSchG,

vgl. Enders, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Juli 2018, § 22 Einführung; Jarass, BImSchG, 12. Auflage, § 22 Rdn. 64,

sowie abfall- und wasserrechtliche Vorschriften zu beachten. Aus diesem Grund ist es auch denkbar, dass im Rahmen der Erteilung der Baugenehmigung von der Behörde Nachweise zur anschließenden Entsorgung der angenommenen Abfälle gefordert werden.

3.5.2.1.3.5 Zwischenergebnis zu Kurzzeitlagern

Soweit es sich um die Kurzzeitlagerung von Abfällen handelt, ist daher kein zwingender gesetzlicher Handlungsbedarf ersichtlich.

3.5.2.2 Nachweis der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung oder gemeinwohlverträglichen Beseitigung bei Langzeitlagern nach DepV

Im Rahmen der Lagerung von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen ist insbesondere zu beachten, dass in einem Langzeitlager nur solche Abfälle angenommen und gelagert werden, für die ein Nachweis der nachfolgenden ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung bzw. gemeinwohlverträgli-

chen Beseitigung vorhanden ist. Wie dieser deponierechtlichen Nachweispflicht nachgekommen werden kann, wurde bislang weder durch die Rechtsprechung noch in der Literatur ausreichend präzisiert. Teilweise wird lediglich verlangt, dass der Antragsteller plausibel macht, dass die anschließende Verwertung möglich sei. Dabei seien Unsicherheiten in Kauf zu nehmen, die aus noch ausstehenden Ausschreibungs-, Genehmigungs- und Gerichtsverfahren für zukünftig zu realisierende Anlagen resultieren können. Ausreichend sei auch eine Darstellung der absehbaren Abfallmengenentwicklung und zukünftig zur Verfügung stehenden Anlagenkapazitäten auf der Grundlage von Markterkundungen über öffentlich bekannte Planungs- und Errichtungsabsichten,

vgl. Beckmann/Wittmann, UPR 2007, 247 (253).

Teilweise wird das Aufzeigen einer

„konkret in Planung befindlichen Verwertungs- oder Behandlungsanlage [...], die jedenfalls bis zum Ende der zugelassenen Lagerungsfrist in Betrieb genommen werden sollte“,

als ausreichend angesehen,

vgl. Klett, in: Frenz/Fischer/Franßen, Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar, Stand: August 2018, DepV, § 1 Rdn. 104.

Die Benennung einer bereits in Betrieb befindlichen Anlage sei hingegen nicht zu verlangen,

vgl. Klett, in: Frenz/Fischer/Franßen, Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar, Stand: August 2018, DepV, § 1 Rdn. 104; Nicklas/Siederer, in: Gaßner/Siederer, Deponierecht, 1. Auflage, S. 220 Rdn. 18.

Demgegenüber wird von anderen Stimmen in der Literatur ein bloßer Hinweis des Betreibers darauf, dass die Abfälle grundsätzlich verwertungsfähig seien oder die Verwertungsmöglichkeiten bei Beendigung der Zwischenlagerung schon aufgezeigt werden könnten, nicht als ausreichend angesehen,

vgl. noch zur DepV a. F. 2002 Petersen/Krohn, AbfallR 2004, 103 (104).

Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend der Umfang dieser deponierechtlichen Nachweispflicht näher untersucht. Dazu wird dargestellt, welche Anhaltspunkte Wortlaut, Systematik, Sinn und Zweck sowie europäische Vorgaben für die Auslegung dieser deponierechtlichen Nachweispflicht liefern.

3.5.2.2.1 Wortlaut

Nach § 23 Abs. 1 Satz 2 DepV gilt die Pflicht des Deponiebetreibers zur unverzüglichen Annahmекontrolle bei jeder Abfallanlieferung nach § 8 Abs. 4 DepV,

„mit der Maßgabe, dass nur Abfälle angenommen werden dürfen, für die ein schriftlicher Nachweis darüber vorliegt, dass die nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung gesichert ist“.

Dem Wortlaut ist folglich nur zu entnehmen, dass ein schriftlicher Nachweis zu führen ist. Wie detailliert dieser Nachweis sein muss, insbesondere ob auch in der Planung oder in Bau befindliche Anlagen in einem Nachweis der nachfolgenden Entsorgung erwähnt werden dürfen, wird aus dem Wortlaut hingegen nicht ersichtlich.

3.5.2.2.2 Genese

- DepV 2002

Langzeitlager wurden in der Deponieverordnung bereits in der ersten Fassung der Deponieverordnung („DepV a. F. 2002“) geregelt,

vgl. § 16 DepV a. F. 2002, BR-Drs. 231/02 (Verordnung), S. 66.

Dies erfolgte zur Umsetzung der europäischen Deponierichtlinie 1999/31/EG („DepRL“), in deren Anwendungsbereich neben Deponien auch Langzeitlager fallen mit der Folge, dass die für die Deponierung geltenden Anforderungen grundsätzlich auch für Langzeitlager gelten sollten,

vgl. BR-Drs. 231/02 (Verordnung), S. 66 und 107.

Zusätzlich musste für die Langzeitlager ein schriftlicher Nachweis vor der Lagerung vorgelegt werden, dass die nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung gesichert war,

vgl. § 16 Abs. 2 Nr. 1 DepV a.F. 2002.

Als Grund für diese zusätzliche Nachweispflicht für Langzeitlager wurde Folgendes angeführt:

„Eine Konkretisierung wird allein bei der Voraussetzung für die Annahme von Abfällen und bei der Entlassung eines Lagers aus der Nachsorge gemacht, da hier dem besonderen Charakter eines Lagers Rechnung zu tragen ist: Bei einem Lager muss vorab sichergestellt sein, dass der angenommene Abfall auch wieder aufgenommen und entsorgt wird“, vgl. BR-Drs. 231/02 (Verordnung), S. 66.

Dieser Nachweis könne beispielsweise durch einen Entsorgungsvertrag erbracht werden,

vgl. BR-Drs. 231/02 (Verordnung), S. 108.

- *DepV 2008*

Im Rahmen der Vereinfachung des Deponierechts im Jahr 2008 übernahm die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts („DepV a. F. 2008“) diese Regelung im Wesentlichen in § 23 Abs. 1 DepV a. F. 2008:

„§ 8 Abs. 4 gilt mit der Maßgabe, dass nur Abfälle angenommen werden dürfen, für die ein schriftlicher Nachweis darüber vorliegt, dass die nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung gesichert ist“, vgl. BR-Drs. 768/08 (Verordnung), S. 20.

In der dazugehörigen Verordnungsbegründung wird wie folgt ausgeführt:

„Da es für einen ordnungsgemäßen Betrieb eines Langzeitlagers entscheidend ist, dass Abfälle nicht nur angenommen, sondern in gleicher Menge auch entsorgt werden, sind von einer Lagerung Abfälle ausgeschlossen, für die kein Nachweis über die nachfolgende Entsorgung vorgelegt werden kann“, vgl. BR-Drs. 768/08 (Verordnung), S. 103; BT-Drs. 16/12223 (Verordnung), S. 69.

Zusätzlich sah zumindest ein Entwurf der DepV a. F. 2008 die Möglichkeit vor, dass eine Behörde den Betreiber eines Langzeitlagers, in dem Abfälle zur Verwertung mehr als drei Jahre gelagert werden, von den deponierechtlichen Anforderungen befreien konnte, solange der Lagerzeitraum befristet und die anschließende Verwertung sichergestellt war,

vgl. BR-Drs. 768/08 (Verordnung), S. 21 und 103.

Diese Möglichkeit wurde jedoch im weiteren Gesetzgebungsverfahren mit folgender Begründung gestrichen:

„Die Regelung führt letztlich zu einer zeitlich unbegrenzten Ausnahmemöglichkeit für die Lagerung von Abfällen, z.B. auch für solche mit hohen organischen Anteilen, mit denen die Ziele der Verordnung unterlaufen werden können. Es ist schon schwierig genug, den Nachweis einer ordnungsgemäßen Verwertung für einen Zeitraum nach drei Jahren behördlich zu überprüfen. Kann die Verwertung dann nicht erfolgen oder erleidet gar ein Lagerbetreiber im weiteren Zeitablauf Insolvenz, so findet de facto eine ungenehmigte Ablagerung statt. Auch lässt die De-

ponierichtlinie eine solche Ausnahme nicht zu.“ BR- Drs. 768/1/08 (Empfehlungen der Ausschüsse), S. 27.

- Erste Novellierung der DepV 2011

Auch § 23 DepV in der Fassung vom 17.10.2011 („DepV a. F. 2011“) enthält die Nachweispflicht unverändert. Allerdings werden quecksilberhaltige Abfälle seit der ersten Novellierung der DepV von dieser Nachweispflicht ausgenommen. Begründet wird dies damit, dass eine nachfolgende schadlose Verwertung für quecksilberhaltige Abfälle nach der EU-Quecksilberverordnung Nr. 1102/2008/EG nicht zulässig sei und die Regelung für eine nachfolgende gemeinwohlverträgliche Beseitigung auf EU-Ebene erst noch erarbeitet werden müsse. Daraus folge, dass ein entsprechender schriftlicher Nachweis über die ordnungsgemäße Entsorgung gar nicht ausgestellt werden könne und die Regelung somit leerlaufe. Daher wurde flüssiges Quecksilber in einem neuen § 23 Abs. 2 DepV a. F. 2011 geregelt,

vgl. BT-Drs. 17/5112, S.18.

- Zweite Novellierung der DepV 2013

Im Rahmen der zweiten Novellierung der DepV erhielt § 23 DepV im Jahr 2013 einen weiteren Abs. 6, der eine Ausnahme für die Langzeitlagerung von Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung zuließ. Auch hier stehe der abschließende Entsorgungsweg noch nicht konkret fest, sondern nur, dass im Grundsatz ein Verfahren zur technischen Phosphorrückgewinnung genutzt werden solle. Dieses befindet sich jedoch noch in der Entwicklung und müsse noch im großtechnischen Praxismaßstab detailliert werden,

vgl. BT-Drs. 17/12454, S.12.

Die Ausnahme ist auf maximal fünf Jahre zu befristen; sie kann befristet verlängert werden. Dadurch solle verdeutlicht werden, dass eine Nachweispflicht über die geplante Entsorgung grundsätzlich bestehe, aber diese Pflicht nur ausnahmsweise nicht zum Tragen komme. Die Zwischenlagerung solle auch für diese Fälle nur eine zeitlich begrenzte Lösung sein,

vgl. BT-Drs. 17/12454 (Verordnung), S. 12.

Festzuhalten bleibt, dass der Gesetzgeber davon ausgegangen ist, dass die Vorlage eines Entsorgungsvertrags ausreichend für die Erfüllung der deponierechtlichen Nachweispflicht ist. Aus dem Umstand, dass der Gesetzgeber zwei Abfallströme (Quecksilberabfälle und Klärschlammmasche) ausdrücklich von der deponierechtlichen Nachweispflicht befreit hat, weil konkrete Entsorgungswege nicht feststanden, folgt als *argumentum e contrario*, dass nach dem Willen des Gesetzgebers der deponierechtliche Nachweis der ordnungsgemäßen Entsorgung nach der Zwischenlagerung grundsätzlich den Nachweis konkreter Entsorgungswege erfordert; ansonsten wären die beiden Gesetzesänderungen nicht notwendig gewesen. Der Gesetzgeber erachtete es offensichtlich nicht als ausreichend, im Rahmen des Nachweises abstrakte und zukünftig mögliche, aber noch nicht abschließend feststehende Entsorgungswege anzugeben.

- Änderung der DepV 2017

Die Ausnahmen von der Nachweisführung für Klärschlämme wurden 2017 erweitert,

vgl. sogleich unter 3.5.2.2.3.2.

3.5.2.2.3 Systematik der DepV

Auch systematische Erwägungen sprechen für hohe Anforderungen an die deponierechtliche Nachweispflicht. § 23 DepV sieht für die Zwischenlagerung von Quecksilberabfällen sowie Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung Ausnahmen von der Nachweispflicht vor, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

3.5.2.2.3.1 *Ausnahmen von der Nachweispflicht für die Zwischenlagerung von metallischen Quecksilberabfällen*

Nach § 23 Abs. 2 Satz 3 DepV gilt für die Zwischenlagerung von metallischen Quecksilberabfällen in Langzeitlagern der Klassen III und IV eine Ausnahme von der deponierechtlichen Nachweispflicht des § 23 Abs. 1 Satz 2 DepV.

Die Begründung der Ausnahme von der Nachweispflicht stellt darauf ab, dass ein entsprechender Nachweis der gesicherten Entsorgung zum damaligen Zeitpunkt mangels gesetzlicher Regelungen noch nicht möglich sei. Dies widerspreche der EU-Quecksilberverordnung (EG) Nr. 1102/2008 („QueckVO“),

vgl. BT-Drs. 17/5112 (Verordnung), S. 18; BT-Drs. 17/11475 (Verordnung), S. 16.

Dies hat zum Hintergrund, dass sichere Beseitigungswege für Quecksilberabfälle zum Zeitpunkt des Erlasses der QueckVO noch erforscht wurden,

vgl. QueckVO, Erwg. 11, 18.

Eine entsprechende Nachweispflicht sei daher faktisch nicht erfüllbar gewesen,

vgl. BT-Drs. 17/5112 (Verordnung), S. 18.

Ein gesonderter Antrag auf Zulassung einer Ausnahme von der deponierechtlichen Nachweispflicht durch die zuständige Behörde ist nicht vorgesehen. Stattdessen ist ein Nachweis über die anschließende Verwertung dieser metallischen Quecksilberabfälle in den Langzeitlagern der Klassen III und IV bereits gesetzlich nicht erforderlich.

In diesem Zusammenhang ist auf die zum 01.01.2018 in Kraft getretene EU-Quecksilberverordnung Nr. 2017/852/EU („QueckVO 2018“) hinzuweisen. Art. 13 QueckVO 2018 enthält Anforderungen an die Lagerung von Quecksilberabfällen. Abweichend von Artikel 5 Abs. 3 Buchstabe a DepRL dürfen Quecksilberabfälle zeitweilig in flüssiger Form gelagert werden, sofern die spezifischen Anforderungen an die zeitweilige Lagerung von Quecksilberabfällen gemäß den Anhängen I, II und III der genannten Richtlinie erfüllt sind und die Lagerung in Übertageanlagen erfolgt, die für die zeitweilige Lagerung von Quecksilberabfällen bestimmt und ausgestattet sind. Die Ausnahmeregelung endet am 01.01.2023. Allerdings überträgt Art. 13 Abs. 2 QueckVO 2018 der Kommission die Befugnis, in delegierten Rechtsakten diese Frist um bis zu drei Jahre zu verlängern.

3.5.2.2.3.2 *Ausnahmen von der deponierechtlichen Nachweispflicht für Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung*

§ 23 Abs. 6 DepV wurde im Rahmen der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017 neu gefasst,

vgl. Art. 2 Nr. 3 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017.

Weiterhin kann auf Antrag eine Ausnahme von der deponierechtlichen Nachweispflicht zugelassen werden.

Diese Möglichkeit war zuvor beschränkt auf Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung, die nicht gemeinsam und ohne Vermischung mit anderen Abfällen zum Zwecke einer späteren Rückgewinnung des Phosphors in einem Langzeitlager gelagert werden. Nunmehr erstreckt sich die Ausnahme auf Aschen aus der Klärschlammverbrennung und aus der Klärschlammmitverbrennung sowie auf kohlenstoffhaltige Rückstände aus der Vorbehandlung von Klärschlamm durch vergleichbare thermische Verfahren, die nicht gemeinsam und ohne Vermischung mit anderen Abfällen zum Zwecke einer späteren Rückgewinnung des Phosphors in einem Langzeitlager gelagert werden.

Die Zwischenlagerung solle selbst dann möglich sein, wenn noch kein abschließender Entsorgungsweg bei Annahme der Abfälle nachgewiesen werden könne. Stattdessen solle zumindest feststehen, dass

diese Aschen und Rückstände grundsätzlich zur technischen Phosphorrückgewinnung genutzt werden sollten und ein Nachweis deshalb nicht geführt werden könne, weil die entsprechenden Anlagen noch in der Entwicklung befindlich oder noch auf dem Markt zu etablieren seien,

vgl. BT-Drs. 17/12454 , S. 12, vgl. auch Begründung zur Klärschlammverordnung:

„Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen stehen im großtechnischen Maßstab derzeit noch nicht zur Verfügung. Es ist allerdings – unter Annahme der aktuellen und kurzfristig prognostizierten wirtschaftlichen Gegebenheiten – davon auszugehen, dass die Rückgewinnung und Aufbereitung von Phosphor aus Klärschlämmen zu Phosphordüngemitteln teurer ist als die Gewinnung von Phosphordünger aus Phosphatgestein. Vor diesem Hintergrund ermöglichen die Bestimmungen des Absatz 3, dass Klärschlammverbrennungsaschen und kohlenstoffhaltige Rückstände entsprechend der Anforderungen der Deponieverordnung auch für einen längeren Zeitraum unter der Voraussetzung separat gelagert werden, dass eine spätere Aufbereitung z.B. zu Phosphordüngemitteln gewährleistet ist. Damit sollen die mit der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung verbundenen zusätzlichen Kostenbelastungen unter den derzeitigen Kostenbedingungen begrenzt werden. Eine Aufbereitung der phosphorhaltigen Aschen kann damit auf einen Zeitpunkt verschoben werden, zu dem die Aufbereitung zu Phosphordüngemitteln im Vergleich zur Herstellung von konventionellen mineralischen Phosphordüngemitteln ökonomisch konkurrenzfähig oder der Absatz auf Grund der Marktreife des gewonnenen Phosphors zu Marktkonditionen erreicht ist.“ vgl. BR-Drs. 255/17 (Verordnung), S. 209 f.

Diese Ausnahme kann längstens für fünf Jahre befristet werden. Die Ausnahme kann befristet auf Antrag von der zuständigen Behörde verlängert werden. Eine Ausnahme für eine Lagerung kann seit der Neufassung der DepV im Zuge der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017 auch über den 30.06.2023 hinaus erteilt werden. Dieses Enddatum wurde ersatzlos gestrichen. Begründet wird die Möglichkeit der Zwischenlagerung von Klärschlamm(mit)verbrennungsaschen damit, dass die erforderlichen Verwertungsanlagen in dem großtechnisch erforderlichen Rahmen derzeit noch nicht vorhanden seien und sich daher die Rückgewinnung wirtschaftlich (noch) nicht lohne,

vgl. Drs.-BT 18/10884 (Verordnung), S. 217 f.; BR-Drs. 255/17 (Verordnung), S. 195.

Ab dem 01.01.2029 treten weitere Änderungen der Klärschlammverordnung („AbfklärV“) in Kraft. Der Klärschlammherzeuger hat als Betreiber der Abwasserbehandlungsanlage ein Wahlrecht, ob er den Klärschlamm einer Phosphorrückgewinnung zuführt oder einer thermischen Vorbehandlung in einer Klärschlamm(mit)verbrennungsanlage,

vgl. Fassung des § 3 Abs. 1 AbfklärV in der Fassung ab dem 01.01.2029 nach Art. 5 Nr. 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017; vgl. Art. 5 Nr. 4, Art. 8 Abs. 3 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017.

Ab dem 01.01.2029 werden auch Betreiber von Klärschlamm(mit)verbrennungsanlagen verpflichtet, die Klärschlammverbrennungsaschen und kohlenstoffhaltigen Rückstände unmittelbar einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen,

vgl. Fassung des § 3 Abs. 2 AbfklärV in der Fassung ab dem 01.01.2029 nach Art. 5 Nr. 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017; vgl. Art. 5 Nr. 2, Nr. 3 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017.

Eine Lagerung der Klärschlamm(mit)verbrennungsaschen vor der Phosphorrückgewinnung ist ab dem 01.01.2019 in einem Langzeitlager nach § 23 DepV nur zulässig, wenn

„1. eine Vermischung mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien und ein oberflächiger Abfluss der Klärschlammasche und des kohlenstoffhaltigen Rückstands ausgeschlossen ist und

2. die Möglichkeit einer späteren Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungsasche und dem kohlenstoffhaltigen Rückstand oder die Möglichkeit einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts der Klärschlammverbrennungsasche und des kohlenstoffhaltigen Rückstands gewährleistet bleibt.“

vgl. § 3b Abs. 3 AbfKlärV in der Fassung ab dem 01.01.2029 nach Art. 5 Nr. 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017.

Ferner werden den Betreibern von Klärschlamm(mit)verbrennungsanlagen Nachweispflichten über die durchgeführte Phosphorrückgewinnung bzw. Langzeitlagerung auferlegt,

vgl. § 3d AbfKlärV in der Fassung ab dem 01.01.2029 nach Art. 5 Nr. 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017.

Die Gesamtkosten für die Langzeitlagerung sowie die Erweiterung bzw. die Neuerrichtung von entsprechenden Langzeitlagern werden auf jährlich 5,2 Mio. Euro und damit auf 37 Euro/t geschätzt, dabei wird von einem Mehrbedarf an Lagerkapazitäten für Klärschlamm(mit)verbrennungsasche von etwa 140.000 t/a ausgegangen,

vgl. Stellungnahmen des Nationalen Normenkontrollrats, BT-Drs. 18/12495 (Verordnung), S. 125, 127.

Der Nationale Normenkontrollrat weist darauf hin, dass sich die Abwasserbehandlungsanlagen durch Entgelte und Gebühren finanzieren. Die Kosten der Phosphorrückgewinnung, die aus der AbfKlärV resultieren, werden daher letztlich zu einem Anstieg der Abwassergebühren führen,

vgl. BT-Drs. 18/12495 (Verordnung), S. 121 ff., 127 f. mit dem Hinweis auf eine entsprechende Änderung der kommunalen Satzungen.

3.5.2.2.3.3 Bedeutung der Ausnahmen für die Nachweispflicht

Die Systematik des § 23 DepV (Grundpflicht in § 23 Abs. 1 DepV und Ausnahmen in § 23 Abs. 2 bzw. 6 DepV) spricht dafür, dass das Aufzeigen potentieller in der Zukunft liegender Verwertungsmöglichkeiten gerade nicht genügen kann, um der Nachweispflicht des § 23 Abs. 1 DepV nachzukommen. So wurde insbesondere für die Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung genau für die Konstellation eine gesetzliche Befreiungsmöglichkeit geschaffen. Für die vorliegenden Stoffströme der edel- und sondermetallhaltigen Abfälle bedeutet dies im Gegenschluss, dass eine Zwischenlagerung daher nur gesetzeskonform zulässig ist, solange eine konkrete Entsorgungsmöglichkeit aufgezeigt werden kann.

3.5.2.2.4 Sinn und Zweck

Der Gesetzgeber wollte mit dieser Regelung sicherstellen, dass Abfälle in einem Langzeitlager nicht nur angenommen werden, sondern anschließend auch in gleicher Menge entsorgt werden. Von diesem Hintergrund sollten Abfälle von einer Lagerung ausgeschlossen werden, für die kein Nachweis über die nachfolgende Entsorgung vorgelegt werden kann,

vgl. BR-Drs. 768/08 (Verordnung), S. 103.

Eine zeitlich unbegrenzte Ausnahmemöglichkeit für die Lagerung von Abfällen wollte der Gesetzgeber vermeiden,

vgl. BR-Drs. 768/1/08, S. 27.

Der Nachweis der anschließenden Entsorgung soll den Vollzug für die Behörden erleichtern. So soll die Zwischenlagerung gerade nicht als Schlupfloch genutzt werden, um Abfälle unkontrolliert unbefristet abzulagern. Stattdessen soll zu jedem Zeitpunkt des Entsorgungswegs der weitere Weg des Abfalls vorgezeichnet sein.

Vor diesem Hintergrund sind eher hohe Anforderungen an die deponierechtliche Nachweispflicht zu stellen. Je konkreter der Nachweis ist, desto einfacher ist es für Behörden, den Entsorgungsweg jederzeit nachzuvollziehen und desto unwahrscheinlicher ist es, dass Entsorgungswege im Nachgang ersatzlos wegfallen und Langzeitlager unbemerkt zu unbefristeten Ablagerungen werden und Gefahren für Mensch und Umwelt hervorrufen können.

Sinn und Zweck stehen einem nachträglichen Wechsel des ursprünglich angezeigten Entsorgungsweges jedoch nicht entgegen, solange nur kontinuierlich eine nachfolgende Entsorgung gesichert ist. So ist beispielsweise im Einklang mit Sinn und Zweck der deponierechtlichen Nachweispflicht denkbar, dass ein Lagerbetreiber zunächst einen möglichen Entsorgungsweg benennt und dazu die erforderlichen Nachweise in Form eines Entsorgungsvertrags einreicht, aber diesen Entsorgungsweg im Nachhinein ändert. Ein solcher Wechsel könnte erforderlich werden, z. B. weil ursprünglich angezeigte Verwertungswege wegfallen (etwa weil der Abfallverwerter, mit dem ein Entsorgungsvertrag abgeschlossen wurde, im Nachhinein insolvent wird oder aus sonstigen Gründen seine Anlage nicht mehr betreibt),

vgl. zu dieser Möglichkeit im abfallrechtlichen Nachweisverfahren unter 3.5.2.1.1.2.

Innerhalb der gleichen Entsorgungsart (von einem Verwertungsweg zu einem anderen Verwertungsweg oder von einem Beseitigungsweg zu einem anderen Beseitigungsweg) sprechen Sinn und Zweck der DepV jedenfalls nicht gegen einen solchen Wechsel, da der Entsorgungsweg jederzeit für die Behörden nachvollziehbar bleibt. In Betracht kommt beispielsweise ein Wechsel von einem vorgesehenen Verwertungsweg (z. B. Verwertung eines Rotors mit edel- oder sondermetallhaltigem Magnet insgesamt) zu einem anderen Verwertungsweg (z. B. getrennte Verwertung des Rotors einerseits und des edel- oder sondermetallhaltigen Magneten andererseits). Ein solcher Wechsel von einer ursprünglich vorgesehenen Verwertung zu einer höherwertigen Verwertung, die sich erst später ergibt, steht insbesondere im Einklang mit §§ 8 Abs. 1, 6 Abs. 2 KrWG, nach welchen stets eine hochwertige Verwertung anzustreben ist und u. a. das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen zu berücksichtigen ist.

Soweit ursprünglich ein Nachweis eingereicht wurde, wie die Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden, und sich im Nachhinein Verwertungsmöglichkeiten für diese Abfälle ergeben, dürfte ein solcher Wechsel des Entsorgungswegs im Hinblick auf die in § 6 KrWG angeordnete Abfallhierarchie sogar gesetzlich geboten sein. Selbst der Wechsel von einer nachgewiesenen Verwertung zu einer anderen (ordnungsgemäßen) Beseitigung dürfte im Hinblick auf den Wortlaut des § 23 Abs. 1 DepV zulässig sein, da dieser sowohl den Verwertungs- als auch den Beseitigungsnachweis (gleichrangig) zur Erfüllung der deponierechtlichen Nachweispflicht zulässt, und steht auch Sinn und Zweck der DepV nicht entgegen, da die anschließende Entsorgung zu jeder Zeit gesichert ist.

Sofern zu Beginn einer Zwischenlagerung eine Beseitigung geplant wird, ist jedoch zu beachten, dass bereits bei einer Lagerdauer von Abfällen zur Beseitigung von mehr als einem Jahr die deponierechtlichen Anforderungen eingreifen (z. B. die Anforderungen an die Errichtung, die Organisation, die Inbetriebnahme, das Annahmeverfahren, die Handhabung der Abfälle und die Maßnahmen zur Kontrolle sowie die Informations- und Dokumentationspflichten des Betreibers). Demgegenüber greifen die deponierechtlichen Pflichten bei der Lagerung von Abfällen zur Verwertung erst ab einer Lagerdauer von mehr als drei Jahren.

3.5.2.2.5 Europäische Vorgaben

Auf europäischer Ebene legt die DepRL den Rahmen für die Annahme von Abfällen auf Deponien fest. Zu Deponien im Sinne des Art. 2 lit. g DepRL gehören auch auf Dauer angelegte (d. h. für länger als ein Jahr eingerichtete) Anlagen, die für die vorübergehende Lagerung von Abfall genutzt werden, jedoch ausgenommen

- „Anlagen, in denen Abfälle abgeladen werden, damit sie für den Weitertransport zur Verwertung, Behandlung oder Beseitigung an einem anderen Ort vorbereitet werden können, sowie
- die in der Regel auf eine Dauer von weniger als drei Jahren begrenzte Lagerung von Abfällen vor der Verwertung oder Behandlung oder
- die auf eine Dauer von weniger als einem Jahr begrenzte Lagerung von Abfällen vor der Beseitigung“.

Für die vorliegende Langzeitlagerung sind daher die Regelungen der DepRL anwendbar.

Bezüglich der Anforderungen zur Zwischenlagerung von Abfällen auf Deponien wird auf die Anwendung der Richtlinie 75/442/EWG verwiesen,

vgl. Erwg. Nr. 14 DepRL.

Diese wurde jedoch durch die Richtlinie 12/2006/EG aufgehoben, welche wiederum durch die Richtlinie 2008/98/EG („AbfallRL“) ersetzt wurde. Die AbfallRL fordert weder eine gesonderte Nachweispflicht für die Annahme von Abfällen zur Zwischenlagerung in Langzeitlagern, noch stellt sie Anforderungen an einen entsprechenden Nachweis. Auch die Entscheidung des Rates 33/2003/EG zur Festlegung der Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien verlangt keinen gesonderten Nachweis für die Zwischenlagerung von Abfällen in Langzeitlagern.

3.5.2.2.6 Auslegung des Umfangs der deponierechtlichen Nachweispflicht

Die Zwischenlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. die Langzeitlagerung von Abfällen zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr bedarf zumindest nach nationaler Gesetzeslage des gesicherten Nachweises der nachfolgenden ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung oder gemeinwohlverträglichen Beseitigung. Wie dieser gesicherte Nachweis zu führen ist, ist nicht ausdrücklich gesetzlich festgelegt.

Aus der Entstehungsgeschichte ergibt sich, dass der Nachweis anhand eines Entsorgungsvertrages möglich ist. Sinn und Zweck dieser deponierechtlichen Nachweispflicht sprechen dafür, dass es bereits gegenwärtig möglich ist, zu Beginn der Lagerung den deponierechtlichen Nachweis zu erfüllen, indem ein Lagerbetreiber einen Entsorgungsvertrag vorlegt, mit dem die anschließende gemeinwohlverträgliche Beseitigung gesichert wird. Sollten sich im Laufe der Lagerung neue Verwertungsmöglichkeiten für die Abfälle ergeben, sprechen Sinn und Zweck der Nachweispflicht nicht dagegen, dass der Lagerbetreiber einen neuen Entsorgungsvertrag vorlegt, mit dem nunmehr die anschließende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nachgewiesen wird. Allerdings muss ein Lagerbetreiber bei der Lagerung von Abfällen zur Beseitigung bereits bei einer Lagerdauer von mehr als einem Jahr alle deponierechtlichen Anforderungen erfüllen.

Die Systematik des § 23 DepV spricht ferner dafür, dass die Erfüllung der deponierechtlichen Nachweispflicht nur möglich ist, wenn konkrete Entsorgungsmöglichkeiten nachgewiesen werden und der Hinweis auf in Bau oder Planung befindliche Entsorgungsanlagen nicht ausreicht. Dem Gesetzgeber ist es jedoch möglich, Ausnahmevorschriften von dieser deponierechtlichen Nachweispflicht auch für den Stoffstrom der edel- und sondermetallhaltigen Abfällen zu schaffen, die sich an den existierenden Ausnahmen des § 23 Abs. 2 bzw. Abs. 6 DepV orientieren können.

3.5.2.2.7 Mögliche Optionen des Gesetzgebers aufgrund der bisher fehlenden Nachweismöglichkeit der Verwertung von Sondermetallen

Eine Langzeitlagerung von Abfällen zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. die Langzeitlagerung von Abfällen zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr ist derzeit zwar möglich, sofern die gesetzlichen Vorschriften eingehalten werden. Problematisch ist jedoch für die vorliegend relevanten edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme, dass in den meisten

Fällen noch keine anschließende gesicherte Verwertung nachgewiesen werden kann, da die dafür erforderlichen Verwertungsanlagen noch nicht gebaut worden sind.

Vor diesem Hintergrund stehen dem nationalen Gesetzgeber die folgenden Optionen zur Verfügung:

3.5.2.2.7.1 Einfügen einer neuen gesetzlichen Ausnahme von der deponierechtlichen Nachweispflicht

Eine erste Möglichkeit des Gesetzgebers besteht darin - in Anlehnung an die existierende Ausnahme des § 23 Abs. 2 DepV - eine weitere gesetzliche Ausnahme von der (deponierechtlichen) Nachweispflicht in § 23 DepV zu schaffen. Sofern diese automatisch nach der DepV eingreift, ist keine weitere Freistellungsentscheidung der zuständigen Behörde erforderlich. Eine solche Lösung hat den Vorteil, dass kein zusätzlicher Verwaltungsaufwand anfällt.

3.5.2.2.7.2 Einfügen einer neuen behördlichen Freistellungsmöglichkeit von der deponierechtlichen Nachweispflicht

Eine andere Möglichkeit des Gesetzgebers besteht darin - in Anlehnung an die existierende Ausnahme des § 23 Abs. 6 DepV für Klärschlammaschen bzw. wie im ursprünglichen Entwurf des § 25 DepV a. F. 2002 für Abfälle zur Verwertung vorgesehen - eine neue behördliche Freistellungsmöglichkeit von der deponierechtlichen Nachweispflicht für edel- und sondermetallhaltige Abfälle im § 23 DepV zu ergänzen. In diesem Fall könnte die zuständige Behörde auf Antrag eine Ausnahme von der deponierechtlichen Nachweispflicht gestatten. Eine solche Vorab-Kontrolle durch die Behörde würde - im Gegensatz zur automatischen gesetzlichen Ausnahme - den Vorteil der erhöhten Transparenz besitzen und den Behörden die Überwachung der nachfolgenden Entsorgung vereinfachen.

Bei beiden Varianten bietet sich eine Befristung der Freistellung, ggf. mit einer Verlängerungsmöglichkeit an. Beide Varianten stehen im Einklang mit DepRL, AbfallRL und dem KrWG, insbesondere, da sie der Sicherstellung des Vorrangs der Verwertung dienen, weil nur mit ihrer Hilfe eine Verwertung der edel- und sondermetallhaltigen Abfälle in einer geplanten, aber noch nicht errichteten Abfallverwertungsanlage gesichert werden kann.

Bei beiden Varianten besteht zusätzlich die Möglichkeit, dass die gesetzliche Pflicht zum Nachweis einer ordnungsgemäßen Beseitigungsmöglichkeit aufrechterhalten wird und der Lagerbetreiber lediglich von der Pflicht zum Nachweis einer ordnungsgemäßen Verwertung befreit wird. Auf diese Weise wäre der Betreiber zu Beginn der Lagerung weiterhin verpflichtet, zumindest einen (subsidiären) gemeinwohlverträglichen Beseitigungsweg nachzuweisen, welcher im Fall des Scheiterns einer geplanten Verwertung genutzt werden kann. Selbst wenn Verwertungsanlagen de facto nicht gebaut und/oder aus anderen Gründen nicht zur Verfügung stehen sollten, wäre auf diese Weise zumindest der anschließende Beseitigungsweg gesichert.

3.5.2.2.7.3 Auswirkungen auf Zwischenlagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren

Soweit die Anforderungen in der DepV für die vorliegenden edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme gesenkt werden sollten, steht zu erwarten, dass diese Änderungen mittelbar auch Auswirkungen auf den behördlichen Vollzug des § 6 BImSchG zeitigen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Behörden bei der Zwischenlagerung von Abfällen vor der Verwertung über einen Zeitraum von weniger als drei Jahren keine höheren Anforderungen an den Nachweis der Entsorgung stellen werden als bei Langzeitlagern, die in den Anwendungsbereich der DepV fallen.

3.5.2.3 Haftung des Betreibers von Zwischenlagern

Im Folgenden wird dargestellt, welcher Haftung der Betreiber eines Zwischenlagers unterliegt.

§ 13 KrWG legt fest, dass sich die Pflichten der Betreiber von genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen, diese so zu errichten und zu betreiben, dass Abfälle vermieden, ver-

wertet oder beseitigt werden, nach den Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes richten. Soweit ein Betreiber errichtungs- oder betriebsbezogene Pflichten nicht ausreichend erfüllt, kann eine für das Immissionsschutzrecht zuständige Behörde das Instrumentarium des BImSchG nutzen, um eventuelle Verstöße zu beseitigen oder zu ahnden,

z.B. §§ 17, 24, 20, 21, 25 BImSchG.

Das BImSchG verweist jedoch teilweise auf das Abfallrecht zurück und bestimmt für die genehmigungsbedürftigen Anlagen, dass sich die Verwertung und Beseitigung von Abfällen nach den Vorschriften des KrWG und den sonstigen für Abfälle geltenden Vorschriften richtet. Bezüglich der nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen gilt, dass diese so zu betreiben sind, dass die beim Betrieb der Anlage entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können,

§§ 5 Abs. 1 Nr. 3, Abs. 3 Nr. 2, 22 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG.

Nach Darstellung der abfallrechtlichen Verantwortlichkeit (3.5.2.3.1) wird auch auf eine mögliche zivil- (3.5.2.3.2), straf- und ordnungswidrigkeitenrechtliche Haftung (3.5.2.3.3) hingewiesen:

3.5.2.3.1 Abfallrechtliche Verantwortung

Jeder Betreiber eines Lang- oder Kurzzeitlagers hat die tatsächliche Sachherrschaft über die in seinem Lager befindlichen Abfälle, so dass er als Abfallbesitzer nach § 3 Abs. 9 KrWG einzustufen ist. Der Betreiber unterliegt damit den abfallrechtlichen Pflichten des Abfallbesitzers gemäß § 3 Abs. 9 KrWG. Neben dem Betreiber des Kurz- bzw. Langzeitlagers bleiben auch die Abfallerzeuger (Abfallersterzeuger) in der Verantwortung für die ordnungsgemäße Entsorgung.

Nach § 7 Abs. 2 Satz 1 KrWG sind Abfallerzeuger und -besitzer zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung der Abfälle muss ordnungsgemäß und schadlos erfolgen. Die Verwertung erfolgt ordnungsgemäß, wenn sie im Einklang mit den Vorschriften des KrWG und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht. Sie erfolgt schadlos, wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind,

§ 7 Abs. 3 KrWG.

Die Verwertung hat Vorrang vor der Beseitigung,

§ 7 Abs. 2 Satz 2 KrWG.

Besitzer bzw. Erzeuger von Abfällen, die nicht verwertet werden, sind verpflichtet, diese nach Maßgabe des § 15 KrWG zu beseitigen, insbesondere darf das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt werden,

§ 15 Abs. 2 Satz 1 KrWG.

Der Betreiber eines Kurz- bzw. Langzeitlagers ist damit für die Verwertung bzw. Beseitigung der Abfälle verantwortlich und hat die dafür bestehenden abfallrechtlichen Vorgaben zu beachten, insbesondere den Vorrang der Verwertung vor der Beseitigung, das Gebot der möglichst hochrangigen Verwertung, bestehende Getrennthaltungsgebote sowie das Gebot der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung im Einklang mit den öffentlich-rechtlichen Vorschriften.

Diese abfallrechtliche Verantwortung bleibt gemäß § 22 Satz 2 KrWG bis zum endgültigen und ordnungsgemäßen Abschluss der Entsorgung selbst dann bestehen, wenn der Abfallersterzeuger bzw. der Kurz- oder Langzeitlagerbetreiber einen Dritten mit der weiteren Entsorgung der Abfälle betraut und den Abfallbesitz aufgibt. Den Abschluss der Entsorgung bildet entweder der erfolgreiche Abschluss eines ordnungsgemäßen Verwertungs- oder Beseitigungsverfahrens nach §§ 7, 15 KrWG oder der Eintritt des Endes der Abfalleigenschaft nach Durchlaufen eines Verwertungsverfahrens nach § 5 KrWG.

So endet die abfallrechtliche Verantwortlichkeit der Abfallersterzeuger und Kurz- oder Langzeitlagerbetreiber nach § 5 KrWG für die Entsorgung der edel- und sondermetallhaltigen Abfälle, wenn die Abfalleigenschaft (z. B. nach entsprechender Aufbereitung) endet und aus den Abfällen ein Produkt wurde,

vgl. im Detail § 5 Abs. 1 KrWG. Dieser verlangt insbesondere, dass die Abfälle nach der Aufbereitung die für ihre neue Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllen; zudem muss ein Markt für sie bestehen und sie dürfen sich nicht negativ auf Mensch und Umwelt auswirken.

Zu beachten ist im Rahmen der abfallrechtlichen Verantwortung insbesondere das Urteil des Bundesverwaltungsgerichts vom 28.06.2007. Demnach erlischt die Entsorgungspflicht des Abfallerzeugers oder -besitzers erst, wenn die Natur oder Zusammensetzung der Abfälle wesentlich verändert wurde oder die entsprechenden Abfälle von einem Dritten verwertet werden,

vgl. BVerwG, Urteil vom 28.06.2007, 7 C 5/07, juris Rdn. 22 f.; vgl. auch BVerwG, Beschluss vom 14.04.2014, 7 B 26/13, juris Rdn. 10.

3.5.2.3.2 Zivilrechtliche Haftung

Im Rahmen des Abfallbesitzes entstehende Schäden können ferner zu einer zivilrechtlichen Haftung führen. Zivilrechtlich kommen dabei aufgrund der Verletzung von Verkehrssicherungspflichten insbesondere eine deliktische, verschuldensabhängige Schadensersatzhaftung nach § 823 Abs. 1 bzw. § 823 Abs. 2 BGB in Verbindung mit §§ 7 Abs. 3, 15 Abs. 2 KrWG (die Verwertung von Abfällen hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen bzw. Abfälle sind so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird) sowie eine verschuldensunabhängige Verpflichtung zur Unterlassung und/oder Beseitigung aller Eigentumsbeeinträchtigungen eines Dritten nach § 1004 BGB in Betracht,

vgl. BGH, Urteil vom 07.10.1975, VI ZR 43/74, NJW 1976, 46 ff.; BGH, Urteil vom 26.09.2006, VI ZR 166/05, NJW 2006, 3628 ff.

Ferner kann sich einzelfallabhängig auch eine Haftung aus § 1 Umwelthaftungsgesetz, ergeben, falls Umwelteinwirkungen, die von einem Kurz- oder Langzeitlager ausgehen, zu Rechtsgutverletzungen und Schäden führen. Dies hängt insbesondere davon ab, ob ein Kurz- oder Langzeitlager im Einzelfall dem Anlagenkatalog des Anhangs 1 Umwelthaftungsgesetz zugeordnet werden kann. Außerdem ist als mögliche Haftungsgrundlage § 89 WHG (Haftung für Änderung der Wasserbeschaffenheit) zu nennen.

3.5.2.3.3 Straf- und ordnungswidrigkeitenrechtliche Haftung

Bei Nichtbeachtung verschiedener Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes kann die zuständige Behörde je nach Verstoß nach § 69 KrWG Bußgelder von bis zu 100.000,00 EUR festsetzen. § 30 des Gesetzes über Ordnungswidrigkeiten („OWiG“) sieht dabei auch die Festsetzung von Bußgeldern gegen das Unternehmen vor, sofern den vertretungsberechtigten Organen ordnungswidriges bzw. strafrechtlich relevantes Handeln oder Unterlassen vorgeworfen werden kann. Soweit der Täter für eine mit Geldbuße bedrohte Handlung oder aus ihr etwas erlangt hat und gegen ihn wegen der Handlung eine Geldbuße nicht festgesetzt wird, kann gegen ihn der Verfall eines Geldbetrages bis zu der Höhe angeordnet werden, die dem Wert des Erlangten entspricht (§ 29a Abs. 1 OWiG). Der Umfang des Erlangten und dessen Wert können nach § 29a Abs. 3 Satz 1 OWiG geschätzt werden. Der Verfall kann jeden Vermögensvorteil im weitesten Sinne betreffen, wie z. B. Einnahmen, Einsparungen, Nutzungen, Dienstleistungen, Besitz und Gewahrsam an beweglichen und unbeweglichen Sachen. Ein Verfall kann nach § 29a Abs. 4 OWiG selbstständig angeordnet werden, selbst wenn gegen den Täter ein Bußgeldverfahren nicht eingeleitet oder eingestellt wird.

Zu beachten ist zudem § 17 Abs. 4 OWiG. Demnach soll die Geldbuße den wirtschaftlichen Vorteil, den der Täter aus der Ordnungswidrigkeit gezogen hat, übersteigen. Soweit das gesetzliche Höchstmaß

nicht ausreicht, kann es überschritten werden. § 17 Abs. 4 OWiG dient der Abschöpfung eines rechtswidrig durch die jeweilige Ordnungswidrigkeit erzielten Vorteils. Als wirtschaftlicher Vorteil gilt der Gewinn aufgrund der Ordnungswidrigkeit, abzüglich der Aufwendungen, die zur Erzielung des Gewinns erforderlich waren. Der nachträgliche Wegfall des Vorteils ist hier ebenfalls zu berücksichtigen. Auch andere kalkulierbare Vorteile wie Besserstellung auf dem Markt und Einsparung von Lasten gelten als Vorteile im Sinne des § 17 Abs. 4 OWiG. Die Behörde entscheidet über die Vorteilsabschöpfung nach pflichtgemäßem Ermessen,

vgl. Bohnert/Krenberger/Krumm, in: Krenberger/Krumm, OWiG, 5. Aufl. 2018, § 17 Rdn. 25 ff.

Eine Strafbarkeit der vertretungsberechtigten Organe oder handelnden Personen des Unternehmens, das Abfallerzeuger oder Abfallbesitzer ist, kommt bei der nicht ordnungsgemäßen Entsorgung in Betracht wegen unerlaubten Umgangs mit Abfällen nach § 326 Strafgesetzbuch („StGB“). § 326 StGB enthält einen Strafrahmen, der eine Geldstrafe oder eine Freiheitsstrafe von bis zu fünf Jahren vorsieht. Auch fahrlässiges Handeln ist insoweit gemäß § 326 Abs. 5 StGB strafbar. Ferner kann ein Verfall angeordnet werden,

vgl. §§ 73 ff. StGB.

3.5.2.4 Zwischenlagerung von Sondermetallen (aus Abfällen) aus Gründen der Rohstoffsicherung durch Wirtschaftsbeteiligte oder den Staat

Im Folgenden wird untersucht, welche Rolle den Wirtschaftsbeteiligten bei der Organisation eines Zwischenlagers zugewiesen werden kann, namentlich ob den Wirtschaftsbeteiligten gesetzlich eine Pflicht zur Bevorratung von Edel- und Sondermetallen vorgeschrieben werden oder welche Rolle der Staat dabei einnehmen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es gegenwärtig noch keine Möglichkeiten gibt, die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle wirtschaftlich zu verwerten. Eine Zwischenlagerungsverpflichtung würde sich – im Gegensatz zur Erdölbevorratung – daher nicht auf den Ausgleich etwaiger heutiger Versorgungsschwierigkeiten richten. Vielmehr ginge es darum, durch die Zwischenlagerung zur zukünftigen Sicherstellung des Bedarfs an Edel- und Sondermetallen beizutragen. Als Beispiel wird zunächst die bereits existierende Bevorratungs- und Beitragspflicht im Erdölbevorratungsgesetz („ErdölBevG“) beschrieben, bevor geprüft wird, ob eine vergleichbare Pflicht auch für Edel- und Sondermetalle gesetzlich verankert werden kann.

Nach §§ 1, 3 ErdölBevG muss der Erdölbevorratungsverband („EBV“) einen Erdölvorrat bereithalten, der den Bedarf von 90 Tagen deckt. Der EBV ist als bundesunmittelbare rechtsfähige Körperschaft des öffentlichen Rechts organisiert,

§§ 2 Abs. 1, 3 ErdölBevG.

Finanziert wird der Erdölbevorratungsverband über die Beiträge seiner Mitglieder,

§ 23 Abs. 1 Satz 1 ErdölBevG.

Mitglied des EBV ist nach § 13 Abs. 1 ErdölBevG, wer in der Europäischen Union, der Schweizerischen Eidgenossenschaft oder im Königreich Norwegen ansässig ist und gewerbsmäßig oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Ottokraftstoff, Dieselmotorkraftstoff, Heizöl Extra Leicht oder Flugturbinenkraftstoff auf Petroleumbasis in den Geltungsbereich dieses Gesetzes einführt oder für eigene Rechnung im Geltungsbereich dieses Gesetzes herstellt oder herstellen lässt, sofern die eingeführte oder hergestellte Gesamtmenge je Kalenderjahr mindestens 25 Tonnen beträgt.

Die Organisation der Erdölbevorratung mittels einer öffentlich-rechtlichen Körperschaft wurde als Kompromiss zwischen einer rein staatlichen und rein privatrechtlichen Lösung gewählt. Die zuvor vorgesehene Bevorratungspflicht der Unternehmen wurde zur Vermeidung von Wettbewerbsproble-

men abgeschafft, eine rein staatliche Lösung wurde unter anderem deshalb abgelehnt, da die Absicherung der Risiken bei der Wirtschaft verbleiben sollte,

vgl. BT-Drs. 8/1634, S. 17.

Die Sicherung der Versorgung mit Erdöl und Erdölzeugnissen wurde gerichtlich als öffentliche Aufgabe und die Bevorratungspflicht als rechtmäßig eingestuft, weil wegen der zunehmenden Einfuhrabhängigkeit der deutschen Energieversorgung selbst vorübergehende Unterbrechungen bestimmter Einfuhrströme ernste wirtschaftliche Störungen verursachen können und zur kurzfristigen Überbrückung möglicher Versorgungsschwierigkeiten die Unterhaltung ständiger Mindestvorräte an den wichtigsten Erdölzeugnissen unerlässlich ist. Aus diesem Grund waren Verfassungsbeschwerden verpflichteter Unternehmen gegen das Gesetz über Mindestvorräte an Erdölzeugnissen in der Fassung vom 09. 09.1965 weitestgehend unbegründet,

vgl. BVerfG, Beschluss vom 16.03.1971, 1 BvR 52/66, 1 BvR 665/66, 1 BvR 667/66, 1 BvR 754/66, juris, Rdn. 52 ff., 68 ff.

Sofern angestrebt werden sollte, Kurz- und Langzeitlager von edel- und sondermetallhaltigen Abfälle in vergleichbarer Weise einzurichten, bedürfte dies insbesondere aufgrund der damit verbundenen Grundrechtseingriffe bei den betroffenen Unternehmen ebenfalls einer entsprechenden besonderen Rechtfertigung. Ferner müsste die Verpflichtung zur Lagerhaltung von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen kohärent sein mit der Rohstoffstrategie der Bundesregierung und der europäischen Rohstoffstrategie,

vgl. zur Rohstoffstrategie der Bundesregierung BR-Drs. 17/3399, S. 4:

„Die Bundesregierung ist sich mit der Wirtschaft einig, dass es grundsätzlich Aufgabe der Wirtschaftsunternehmen ist, ihre Rohstoffversorgung sicherzustellen. Die staatlichen Aktivitäten auf Bundesebene konzentrieren sich darauf, die Rohstoffsicherungsbemühungen der Wirtschaft nachdrücklich und effizient zu flankieren, wobei sich konkrete Maßnahmen am Leitgedanken der Nachhaltigen Entwicklung orientieren.

Die flankierenden Maßnahmen betreffen vor allem die Unterstützung der Wirtschaft durch das rohstoffpolitische Förderinstrumentarium, die Forschungsförderung sowie die kohärente gestaltende Rohstoffaußenpolitik unter Berücksichtigung außen-, wirtschafts- und entwicklungspolitischer Ziele. Die Bundesregierung setzt sich darüber hinaus bei den Landesregierungen dafür ein, dass bei der Exploration und Gewinnung heimischer Rohstoffe den Interessen der Rohstoffwirtschaft im Rahmen der Raumordnung und Landesplanung sowie bei Genehmigungsverfahren angemessen Rechnung getragen wird.

Die Bundesregierung beabsichtigt nicht, im Bereich der Rohstoffwirtschaft selbst unternehmerisch tätig zu werden, etwa durch Gründung einer Staatsgesellschaft für Explorations- oder Rohstoffgewinnungsvorhaben. **Auch einer staatlichen Bevorratung von Industrierohstoffen steht die Bundesregierung ablehnend gegenüber.**“ [Hervorhebung der Verfasser];

vgl. zur EU-Rohstoffstrategie Mitteilung vom 02.02.2011 „Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze“ KOM (2011) 25 sowie Bericht der Kommission über die Umsetzung der Rohstoffinitiative KOM (2013) 442 final, S. 4, dort heißt es:

„Zur Prüfung der Option einer Bevorratung gaben die Dienststellen der Kommission eine Studie mit einer vorläufigen Beurteilung in Auftrag. Im Rahmen der Studie wurden verschiedene Konzepte und Verfahren der Bevorratung analysiert, darunter das EU-Bevorratungsprogramm für Rohöl, und die gegenwärtigen weltweit eingesetzten Verfahren für die Bevorratung von Rohstoffen sowie die potenziellen Kosten und Vorteile

eines Programms für die Bevorratung kritischer Rohstoffe geprüft. Im Rahmen dieser unabhängigen Studie wurde die Möglichkeit, ein freiwilliges Bevorratungsprogramm der Industrie mit öffentlicher Finanzhilfe aufzustellen, als eine gangbare Option betrachtet. Es wird ferner anerkannt, dass Bevorratung nur kurzfristige Probleme lösen kann, langfristige Rohstoffknappheit erfordert hinsichtlich der Versorgung (Substitution, Recycling, Gewinnung im Inland) hingegen strukturelle Lösungen. Darüber hinaus ist die Bevorratung ein Instrument ohne ausreichende Flexibilität, da eine rasche Anpassung der Volumina nicht möglich ist und die Umsetzungskosten beträchtlich sind. Ferner wären für die Bevorratung für jeden Rohstoff präzise Kenntnisse der Lieferketten und Anwendungen sowie der Verarbeitungsanlagen erforderlich (sind entsprechende Anlagen nicht gesichert, ist die Bevorratung nicht sinnvoll). Auch die Meinungen der Interessenträger zum Thema Bevorratung sind stark geteilt. Die Ergebnisse der Studie wurden im Rahmen der Arbeitsgruppe „Rohstoffversorgung“ der Kommission im November 2012 erörtert, die Reaktionen im Hinblick auf ein mögliches Bevorratungsprogramm waren durchweg negativ. Kein einziger Mitgliedstaat wäre bereit, ein Bevorratungsprogramm als politische Option zu unterstützen. Die Kommission wird dieses Thema weiterhin verfolgen.“

vgl. ferner Europäische Kommission, SWD (2014) 171 final, S. 16:

„Im Ergebnis plant die Kommission gegenwärtig nicht, ein EU-weites Bevorratungssystem für Rohstoffe einzurichten.“

Eine Bevorratungspflicht für Edel- und Sondermetalle würde daher eine Änderung der europäischen und deutschen Rohstoffstrategie voraussetzen. Zudem müsste die Bevorratungspflicht dem Verhältnismäßigkeitsprinzip genügen, d. h. für den verfolgten Zweck (Sicherung der Versorgung mit bestimmten Edel- und Sondermetallen) geeignet, erforderlich und angemessen sein.

Dass grundsätzlich auch eine andere Rohstoffpolitik verfolgt und demnach eine Bevorratung praktiziert werden könnte, zeigt ein Vergleich mit Japan und den USA.

Die Rohstoffpolitik in Japan ist maßgeblich von der Rohstoffarmut des Landes geprägt. Zur Sicherstellung einer stabilen Rohstoffversorgung gibt es in Japan eine Bevorratung von Rohstoffreserven. Dies ist insbesondere Aufgabe der staatlichen Japan Oil, Gas and Metals National Corporation („JOGMEC“) und des Ministry for Economy, Trade and Industry („METI“). Neben Öl und Flüssiggas werden auch seltene Metalle bevorratet. Dazu gehörten u.a. die Metalle Chrom, Gallium, Indium, Kobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Platin, Seltene Erden, Strontium, Tantal, Vanadium und Wolfram. Welche Rohstoffe und Metalle genau in welcher Menge gelagert werden, wird nicht mehr veröffentlicht, um keine Spekulationen anzuheizen,

Hilpert/Mildner, SWP/BGR-Studie, Analyse und Vergleich der Rohstoffstrategien der G20-Staaten, Februar 2013, S. 111 mit dem Verweis auf die Strategie des METI vom 28.07.2009.

Das Ziel ist es, einen Lagerbestand für 60 Tage an seltenen Metallen zu bevorraten. Davon soll JOGMEC 42 Tage, die Privatwirtschaft 18 Tage abdecken,

JOGMEC, Annual Report 2017, Year ended March 31, 2017, S. 27.

Auch in den USA gibt es eine staatliche Vorratshaltung an kritischen Rohstoffen, vor allem im militärischen Rahmen. Mit dem Strategic and Critical Materials Stockpiling Act wurde bereits 1939 ein staatliches Bevorratungssystem für das Militär (National Defense Stockpile, „NDS“) für bestimmte, als strategisch und kritisch eingestufte Rohstoffe etabliert,

Strategic and Critical Materials Stockpiling Act (50, Code of Laws of the United States of America („U.S.C“) § 98 et seq.); vgl. auch Defense Production Act (50 U.S.C. App. 2061 et seq.); National Defense Authorization Act.

Das NDS umfasst 42 unterschiedliche Materialien mit einem gegenwärtigen Marktwert von über \$ 1,1 Milliarde. Bevorratet werden unter anderem Zink, Kobalt, Platinum, Palladium und Iridium,

vgl. Eigendarstellung des NDS unter

<http://www.dla.mil/HQ/Acquisition/StrategicMaterials/About/OurOffices.aspx> (letzter Abruf am 28.06.2018).

Verwaltet wird der NDS von National Defense Stockpile Manager. Dies ist die Defense Logistics Agency („DLA“), eine Untergliederung des Verteidigungsministeriums,

vgl. Sec. 16 Strategic and Critical Materials Stockpiling Act; Department of Defense, Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, Strategic and Critical Materials Operations Report to Congress, Januar 2017, S. 5.

Es gibt jährliche Berichtspflichten gegenüber dem Kongress, in dem die Tätigkeiten der National Defense Stockpile Manager, insbesondere der (geplante) An- und Verkauf von Rohstoffen, zusammengefasst werden. Der An- bzw. Verkauf von Materialien muss gesetzlich vom Kongress gestattet werden,

vgl. für 2017 z. B. Sec. 1411 f. National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2017; Department of Defense, Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, Strategic and Critical Materials Operations Report to Congress, Januar 2017, S. 8.

Finanziert wird der NDS durch einen Fonds, dem National Defense Stockpile Transaction Fund, in welchen die Erlöse aus Veräußerungen von Materialien des NDS eingespeist werden und der wiederum Teil der allgemeinen Staatskasse (Treasury of the United States) ist,

vgl. Sec. 9 Strategic and Critical Materials Stockpiling Act; Department of Defense, Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, Strategic and Critical Materials Operations Report to Congress, Januar 2017, S. 15 f.

3.5.2.5 Ausgestaltung der Zwischenlagerung (Betreiber, Finanzierung)

Im Folgenden wird dargestellt, wie ein Zwischenlager ausgestaltet werden kann, insbesondere, wer Betreiber eines Zwischenlagers sein kann (3.5.2.5.1) und wer zur Finanzierung eines solchen Lagers verpflichtet werden kann (3.5.2.5.2).

3.5.2.5.1 Betreiber eines Zwischenlagers

Die DepV definiert lediglich den Deponiebetreiber in § 2 Nr. 12 DepV als

„natürliche oder juristische Person, die die rechtliche oder tatsächliche Verfügungsgewalt über eine Deponie inne hat“.

Weder das BImSchG, das KrWG oder die DepV definieren den Begriff „Betreiber des Langzeitlagers“. Daher ist auf die allgemeine Betreiberdefinition des BImSchG zurückzugreifen. Anlagenbetreiber ist diejenige natürliche oder juristische Person, welche die Genehmigung ausnutzt und den bestimmenden Einfluss auf die Lage, die Beschaffenheit und den Betrieb einer Anlage hat. Dies trifft regelmäßig auf denjenigen zu, der die Anlage auf eigene Rechnung und in eigener Verantwortung in Gebrauch hat und die tatsächliche und rechtliche Verfügungsgewalt in eigener Verantwortung ausübt. Es kommt hingegen nicht darauf an, wer Eigentümer der Anlage ist oder wem die Genehmigung erteilt wurde,

vgl. Jarass, BImSchG, 12. Auflage 2017, § 3 Rdn. 87 ff; Müggenborg, in: Schink/Versteyl, KrWG, 2. Auflage 2017, § 13 Rdn. 10 m. w. N.; Petersen, in: Jarass/Petersen, KrWG, 2014, § 13 Rdn. 14.

Dies steht im Einklang mit den Vorgaben der Richtlinie über Industrieemissionen 2010/75/EG, welche in Art. 3 Nr. 15 den Betreiber definiert als:

„jede natürliche oder juristische Person, die die Anlage ... vollständig oder teilweise betreibt oder besitzt oder der – sofern in den nationalen Rechtsvorschriften vorgesehen – die ausschlaggebende wirtschaftliche Verfügungsmacht über deren technischen Betrieb übertragen worden ist.“

Soweit eine juristische Person des privaten oder öffentlichen Rechts diesen bestimmenden Einfluss ausübt, ist diese der Anlagenbetreiber, nicht der Geschäftsführer, der Vorstand oder ein sonstiges Organ der juristischen Person,

vgl. Jarass, BImSchG, 12. Auflage 2017, § 3 Rdn. 90; OVG Lüneburg, Urteil vom 25.09.2003, 1 LC 276/02, juris Rdn. 36.

Eine handelsrechtlich bestehende Möglichkeit der Einflussnahme oder Mithaftung (z.B. aufgrund §§ 114, 128 HGB) führt daher nicht zur Verlagerung der Betreibereigenschaft auf den Geschäftsführer oder Gesellschafter.

Der Betrieb eines Langzeitlagers unterscheidet sich zwar vom Betrieb einer Deponie. So werden auf Deponien Abfälle grundsätzlich zeitlich unbegrenzt abgelagert, während die Abfälle aus den Langzeitlagern später einer weiteren Verwertung zugeführt werden sollen. Dennoch geht der Gesetzgeber davon aus, dass sowohl Deponien als auch Langzeitlager durch eine öffentlich-rechtliche Körperschaft, einen Eigenbetrieb oder eine Eigengesellschaft einer öffentlich-rechtlichen Körperschaft, einen Zweckverband oder eine Anstalt des öffentlichen Rechts betrieben werden können,

§ 18 Abs. 4, 23 Abs. 1 DepV, vgl. zu Deponien § 43 KrWG; Beckmann, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht KrWG, Stand: Juli 2018, § 43 Rdn. 52.

Der Betrieb könnte auch im Rahmen einer Öffentlich-Privaten-Partnerschaft („ÖPP“) durchgeführt werden, die es beispielsweise beim Betrieb von Autobahnen und der Mauterhebung gibt,

vgl. beispielsweise den Betrieb einer Sonderabfalldeponie durch die GBS Sonderabfallentsorgung Bayern GmbH, deren Gesellschafter neben dem Freistaat Bayern (79,1%), auch 56 Unternehmen aus Industrie und Gewerbe (14,4 %) sowie die kommunalen Spitzenverbände (Bayerischer Gemeindetag, Bayerischer Städtetag, Bayerischer Landkreistag, 6,5%) sind, welche für ihre Entsorgungsleistungen mit ihren Kunden Vertragspreise vereinbart.

3.5.2.5.2 Finanzierung

Die Finanzierung eines Kurz- oder Langzeitlagers hängt unter anderem davon ab, wer Betreiber des Lagers ist. Soweit der Betrieb eines Kurz- oder Langzeitlagers als öffentliche Einrichtung geführt wird, können als Gegenleistung für die Inanspruchnahme nach Maßgabe des für die jeweilige Einrichtung geltenden Rechts Benutzungsgebühren erhoben werden. Wird es durch einen privaten Betreiber geführt, kann dieser mit den Anlieferern Entgelte vereinbaren. In Betracht kommt ferner eine Kostenübernahme der Hersteller und Vertreiber von edel- und sondermetallhaltigen Produkten. Im Folgenden werden ein kurzer Überblick und eine cursorische Einschätzung einzelner Finanzierungsmodelle gegeben. Detailfragen hängen dabei von der konkreten gesetzlichen Ausgestaltung der Rücknahme ab. Einen Anreiz zu Innovationen, insbesondere zu Produktentwicklungen, welche die spätere Entsorgung der edel- und sondermetallhaltigen Produkte möglichst wirtschaftlich und umweltverträglich gestalten, wird durch Inanspruchnahme der Hersteller und Vertreiber von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen gefördert. Wenn die Hersteller und Vertreiber an den Kosten für die Zwischenlagerung beteiligt werden, besteht für sie ein Anreiz, solche Zwischenlagerzeiträume möglichst gering zu halten.

3.5.2.5.2.1 Finanzierung über kommunale Abfallgebühren

Soweit die Kurz- oder Langzeitlager als öffentliche Einrichtung betrieben werden sollten, kommt eine Finanzierung über Abfallgebühren in Betracht.

Bei kommunalen Abfallgebühren sind grundsätzlich nur die einrichtungsbedingten Kosten der öffentlichen Abfallentsorgung ansatzfähig. Demgegenüber sind Kosten außerhalb des gesetzlich zugewiesenen Aufgabenbereichs des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers nicht ansatzfähig im Rahmen der Abfallgebühren,

vgl. nur VGH Baden-Württemberg, Beschl. v. 27.02.1996, 2 S 1407/94, juris, Rdn. 74 f.

Die Gebührensschuldnerschaft knüpft regelmäßig an die abfallrechtlich normierte Überlassungspflicht an, da die Entsorgungspflicht der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger das Gegenstück der Abfallüberlassungspflicht aus § 17 KrWG darstellt,

vgl. Schwind, in: von Lersner/Wendenburg/Versteyl, Recht der Abfallbeseitigung, Stand: Oktober 2018, § 17 KrWG Rdn. 81; vgl. Giesberts, in: Giesberts/Reinhardt: BeckOK UmweltR, KrWG, Stand: April 2018, KrWG § 17 Rdn. 1; vgl. Beckmann, in: Landmann/Rohmer UmweltR, KrWG, Stand: Juli 2018, § 17 KrWG Rdn. 11 ff.; vgl. noch zum KrW-/AbfG Schink, in: Mann/Püttner, Handbuch der kommunalen Wissenschaft und Praxis, 3. Auflage 2011, § 55 Rdn. 41; VG Koblenz, Urteil vom 24.03.2009, 7 K 1189/08.KO, juris, Rdn. 23.

Abfälle aus privaten Haushalten sind nach dem allgemeinen Kreislaufwirtschaftsrecht grundsätzlich überlassungspflichtig. Erzeuger und Besitzer von Abfällen zur Beseitigung aus anderen Herkunftsbereichen sind überlassungspflichtig, soweit sie diese nicht in eigenen Anlagen beseitigen. § 17 KrWG sieht ferner verschiedene Ausnahmen von der Überlassungspflicht vor. Ausnahmen von der Überlassungspflicht bestehen nach § 17 Abs. 2 KrWG

- „1. die einer Rücknahme- oder Rückgabepflicht auf Grund einer Rechtsverordnung nach § 25 unterliegen, soweit nicht die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger auf Grund einer Bestimmung nach § 25 Absatz 2 Nummer 4 an der Rücknahme mitwirken; hierfür kann insbesondere eine einheitliche Wertstofftonne oder eine einheitliche Wertstoffeffassung in vergleichbarer Qualität vorgesehen werden, durch die werthaltige Abfälle aus privaten Haushalten in effizienter Weise erfasst und einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden,
2. die in Wahrnehmung der Produktverantwortung nach § 26 freiwillig zurückgenommen werden, soweit dem zurücknehmenden Hersteller oder Vertreiber ein Freistellungs- oder Feststellungsbescheid nach § 26 Absatz 3 oder Absatz 6 erteilt worden ist,
3. die durch gemeinnützige Sammlung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung zugeführt werden,
4. die durch gewerbliche Sammlung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung zugeführt werden, soweit überwiegende öffentliche Interessen dieser Sammlung nicht entgegenstehen.“

Die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle aus privaten Haushalten sind regelmäßig dem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger zu überlassen, soweit keine der vorgenannten Ausnahmen eingreift.

Zu beachten ist allerdings, dass Altfahrzeuge, die einer Rücknahmepflicht nach § 17 Abs. 2 KrWG unterfallen, nicht dem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger, sondern anerkannten Annahme- oder Rücknahmestellen oder anerkannten Demontagebetrieben zu überlassen sind,

§ 4 Abs. 1 AltfahrzeugV.

Ferner können spezielle Produktverantwortungsregelungen auch lediglich die Pflicht zu einer getrennten Sammlung beinhalten, aber keine Überlassungspflicht (nur) an den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger,

vgl. zum Beispiel § 10 ElektroG, § 11 BattG sowie ab dem 01.01.2019 § 13 Verpackungsgesetz.

Das Gleiche gilt für die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle, die in anderen Herkunftsbereichen anfallen, solange keine Beseitigung in eigenen Anlagen erfolgt und eine Verwertung nicht möglich ist. In diesem Zusammenhang ist allerdings näher zu prüfen, inwieweit die Zwischenlagerung als Teil der Verwertung der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger nach § 7 Abs. 4 KrWG auf das technisch Mögliche und wirtschaftlich Zumutbare zu beschränken ist und einer Gebührenpflicht entgegenstehen kann, dass Verwertungsmöglichkeiten de facto momentan noch nicht existieren. Ferner spricht gegen eine abfallgebührenrechtliche Lösung, dass - solange Hersteller und Vertreiber der edel- und sondermetallhaltigen Produkte nicht an den Kosten für die Lagerung beteiligt werden – für diese auch kein Anreiz besteht, an der Entwicklung von Verwertungstechniken mitzuwirken und ihre Produkte so zu gestalten und zu kennzeichnen, dass eine zeitnahe Verwertung ermöglicht wird.

Ferner müssen öffentlich-rechtliche Betreiber der Zwischenlager neben den abfallgebührenrechtlichen auch wettbewerbs- und beihilferechtliche Vorschriften (Art. 107 ff. Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“)) beachten. Staatliche oder aus staatlichen Mitteln gewährte Beihilfen gleich welcher Art, die durch die Begünstigung bestimmter Unternehmen oder Produktionszweige den Wettbewerb verfälschen oder zu verfälschen drohen, sind mit dem Binnenmarkt unvereinbar, soweit sie den Handel zwischen Mitgliedstaaten beeinträchtigen. Dies gilt insbesondere für Quersubventionierungen. Nach der Definition der Europäischen Kommission ist eine Quersubvention dabei dann anzunehmen, wenn ein Unternehmen die in einem räumlich und/oder sachlich relevanten Markt anfallenden Kosten ganz oder teilweise auf Produkte aus einem anderen räumlichen und/oder sachlichen relevanten Markt abwälzt,

vgl. Europäische Kommission, Bekanntmachung zur Anwendung der EG-Wettbewerbsregeln im Postsektor und im Telekommunikationsbereich, ABl. EG 1998 C 39/2, Ziff. 31.

Eine Quersubventionierung kann z. B. in Betracht kommen, wenn Verluste aus der gewerblichen, nicht hoheitlichen Tätigkeit eines öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers durch überhöhte Abfallgebühren in der (hoheitlichen) Entsorgungssparte des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers ausgeglichen werden. Soweit eine Zwischenlagerung als Teil der gewerblichen, nicht hoheitlichen Tätigkeit erfolgen sollte, dürfen daraus ggf. entstehende Verluste daher nicht durch erhöhte Abfallgebühren im hoheitlichen Bereich ausgeglichen werden.

Ein Beispiel für ein Finanzierungsmodell mittels Abfallgebühren ist die Finanzierung des Verbands für Flächenrecycling und Altlastensanierung („AAV“), zu dessen Aufgaben gehören nach § 2 Abs. 1 Altlastensanierungs- und Altlastenaufbereitungsverbandsgesetz („AAVG“):

1. die Sanierungsuntersuchung, -planung und Sanierung von Altlasten oder schädlichen Bodenveränderungen nach den Vorschriften des BBodSchG einschließlich der im Zusammenhang damit auszuführenden Maßnahmen;
2. das Flächenrecycling, um Brachflächen und Altlastengrundstücke für eine neue Nutzung zu reaktivieren und damit den Flächenverbrauch naturnaher und landwirtschaftlich genutzter Flächen zu reduzieren;
3. die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien und innovativer Verfahren zur Sanierung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, zur Förderung des Flächenrecyclings sowie des Gewässerschutzes.

Der AAV ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts für das Gebiet des Landes Nordrhein-Westfalen. Mitglieder sind nach § 6 Abs. 1 AAVG die nordrhein-westfälischen Kreise und kreisfreien Städte und das Land Nordrhein-Westfalen. Daneben gibt es freiwillige Mitglieder des Verbandes nach § 6 Abs. 2 AAVG. Dies sind alle natürlichen und juristischen Personen des Privatrechts und des öffentlichen Rechts sowie deren Zusammenschlüsse, die sich zu freiwilligen Beiträgen gegenüber dem Verband verpflichtet haben.

Der AAV ist Nachfolger des Abfallentsorgungs- und Altlastensanierungsverbands NRW, der sich fast ausschließlich über Lizenzentgelte finanzierte, die auf der Grundlage der §§ 10 ff. Landesabfallgesetz NRW in der Fassung vom 21.06.1988 („LAbfG 1988“) erhoben wurden. Lizenzentgeltspflichtig waren insbesondere private Entsorgungsunternehmen, produzierende Unternehmen mit eigenen Entsorgungsanlagen und Kommunen. Das nordrhein-westfälische Modell der Sonderabfallentsorgung und Altlastenfinanzierung, insbesondere die nordrhein-westfälische Lizenzpflicht des § 10 LAbfG 1988, wurde vom Bundesverfassungsgericht wegen fehlender landesrechtlicher Regelungskompetenz jedoch als verfassungswidrig eingestuft,

vgl. BVerfG, Beschluss vom 29.03.2000, 2 BvL 3/96.

Nunmehr erhält der AAV zur Erfüllung seiner Aufgaben Beiträge und zweckgebundene Mittel seiner Mitglieder. Die Beiträge der freiwilligen Mitglieder nach § 6 Absatz 2 AAVG sind freiwillig und in der Satzung des AAV geregelt. Die Beitragspflichten der Kreise und kreisfreien Städte und das Land NRW sind öffentliche Lasten (Abgaben). Die Beiträge und sonstige Zahlungen an den AAV gehören zu den ansatzfähigen Kosten bei der Kalkulation der Benutzungsgebühren durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger,

§ 9 Abs. 2 Satz 2 Landesabfallgesetz NRW.

3.5.2.5.2.2 *Beteiligung der Hersteller und Vertrieber an den Kosten für Lagerung*

Beispiele für die Finanzierung eines Lagers über eine Beitragspflicht der Hersteller kann – neben bereits dargestellten Regelungen des Erdölbevorratungsgesetzes – eine Fondslösung oder Kostentragungspflichten im Rahmen einer erweiterten Produktverantwortung sein.

3.5.2.5.2.2.1 *Finanzierung über Fonds der Hersteller und Vertrieber*

Zu beachten sind die Erwägungen des Gesetzgebers im Zusammenhang mit der Entsorgung von Altfahrzeugen, in welcher eine Finanzierung über einen Herstellerfonds abgelehnt wurde.

In § 3 der Altfahrzeugverordnung („AltfahrzeugV“) sind unentgeltliche Rücknahmepflichten der Fahrzeughersteller für Altfahrzeuge vorgesehen. Im Rahmen des Gesetzgebungsprozesses wurde alternativ die Errichtung eines Fonds diskutiert, in welchen die Hersteller oder Halter einzahlen und der die Entsorgung der Altfahrzeuge absichern sollte,

vgl. zu einer solchen Fondslösung z. B. das Entsorgungsfondsgesetzes („EntsorgFondsG“), das die Finanzierung der Kosten für die sichere Entsorgung der entstandenen und zukünftig noch entstehenden radioaktiven Abfälle aus der gewerblichen Nutzung der Kernenergie zur Erzeugung von Elektrizität in Deutschland regelt.

Laut der Gesetzesbegründung war ein solcher Fonds, der die jeweils gleiche Beteiligung der Hersteller sicherstelle, nur in einer monopolartigen Struktur mit Solidarcharakter denkbar. Aus wettbewerbs- und kartellrechtlichen Gründen zog der Gesetzgeber daher die dezentrale Verpflichtung der Hersteller vor. Als weiteren Grund nannte der Gesetzgeber, dass eine monopolartige Fondsstruktur den Wettbewerb um innovative Recyclingtechniken nicht fördere, sondern die Gestaltungsfreiheit der Marktakteure beschränke,

vgl. BR-Drs. 1075/01, S. 49 f.

Diese Argumente greifen auch vorliegend ein, so dass eine Finanzierung über einen Herstellerfonds abzulehnen ist.

Hinzuweisen ist schließlich noch auf die Unterschiede zur Fondslösung im Rahmen der Entsorgung von radioaktiven Abfällen. Der dort vorgesehene Fonds kann mit den Besonderheiten im Bereich der atomrechtlichen Entsorgung, insbesondere der besonderen Gefährdungslage bei der Entsorgung von

radioaktiven Abfällen, gerechtfertigt werden kann. Eine vergleichbare Gefährdung geht von Kurz- oder Langzeitlagern von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen nicht aus. Ferner würde ein solcher Fonds den Innovationswettbewerb zwischen Herstellern, Vertreibern und Entsorgern von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen nicht fördern.

3.5.2.5.2.2 *Beteiligung der Hersteller und Vertreter über Produktverantwortung*

Wie unter 2.3.4 bereits dargestellt, hat der Gesetzgeber die Möglichkeit, gesetzliche Regelungen für Pflichten von Herstellern von edel- und sondermetallhaltige Produkten, wie beispielsweise NdFeB-Magneten, in einer separaten Rechtsverordnung oder einem separatem Gesetz zu regeln. Als Rechtsgrundlage kommt § 25 KrWG in Betracht. In einem solchen Regelwerk können neben Pflichten zur Kennzeichnung, Erfassung, Rücknahme, Verwertung und Weitergabe von Demontagehinweisen auch Vorschriften zur Kostentragungspflicht von Produktverantwortlichen geregelt werden (§ 25 Abs. 2 Nr. 1 KrWG),

vgl. zur erweiterten Hersteller- und Produktverantwortung auch Art. 8 und Art. 8 AbfallRL, geändert bzw. eingefügt durch Richtlinie 2018/851/EG vom 30.05.2018.

Abhängig von der Ausgestaltung einer solchen Rechtsverordnung ist näher zu prüfen, inwieweit Hersteller mit den Kosten für den Betrieb von Kurz- oder Langzeitlagern belastet werden können, welcher eine spätere Verwertung sicherstellen soll, deren technische Durchführung momentan nicht gesichert ist. Einerseits bildet auch die Zwischenlagerung einen Teil des Verwertungs Vorgangs. Andererseits ist die Verwertungspflicht nach § 7 Abs. 4 KrWG auf das technisch Mögliche und wirtschaftlich Zumutbare beschränkt, während Verwertungsmöglichkeiten de facto momentan noch nicht existieren. Ferner ist bei Erlass eines solchen Regelwerks eine Abgrenzung bzw. Verzahnung mit dem ElektroG, der AltfahrzeugV bzw. den entsprechenden europäischen Richtlinien erforderlich. Problematisch könnte insbesondere ein Zielkonflikt mit der WEEE-RL sein, welche keine Pflicht zur Langzeitlagerung enthält, sondern eine schnellstmögliche Verwertung anstrebt,

vgl. zu Zielkonflikten und Lösungsvorschlägen dazu die Ausführungen zur WEEE-RL und zum ElektroG unter 2.3.2.3 und 2.3.2.4

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass in einem solchen Regelwerk auch Pflichten der Abfallbesitzer zur Überlassung an Produktverantwortliche bzw. von diesen eingerichteten Rücknahmesystemen verankert werden können,

§ 25 Abs. 2 Nr. 2 und 3 KrWG, vgl. beispielsweise § 4 AltfahrzeugV und die dort normierte Pflicht zur Überlassung an anerkannte Annahme- oder Rücknahmestellen oder anerkannten Demontagebetrieben.

Die Überlassungspflichten nach § 17 KrWG würden in diesem Fall nicht unmittelbar eingreifen, entsprechend könnten keine Abfallgebühren für die Zwischenlagerung erhoben werden. Zu beachten ist jedoch, dass § 25 Abs. 2 Nr. 4 KrWG vorsieht, dass in einer Rechtsverordnung zur Wahrnehmung der Produktverantwortung auch geregelt werden kann, dass die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger durch Erfassung der Abfälle als ihnen übertragene Aufgabe bei der Rücknahme mitwirken und dass die Produktverantwortlichen, die edel- und sondermetallhaltige Abfälle zurückgenommen haben, ihrerseits überlassungspflichtig sein können. Etwaige Getrennthaltungspflichten der Abfallbesitzer können auf § 10 Abs. 1 Nr. 2 und 3 KrWG gestützt werden, wobei auch hier Detailfragen von der konkreten Ausgestaltung der Rücknahme abhängen.

3.5.2.6 Keine Andienungspflicht für edel- und sondermetallhaltige Abfälle

Ferner ist darauf hinzuweisen, dass eine Andienungspflicht von den Ländern für edel- und sondermetallhaltige Abfälle nicht auf § 17 Abs. 4 Satz 1 KrWG gestützt werden kann. § 17 Abs. 4 KrWG erlaubt den Bundesländern zur Sicherstellung der umweltverträglichen Beseitigung Andienungs- und Über-

lassungspflichten zu bestimmen. Vorliegend sollen die edel- und sondermetallhaltigen Abfälle jedoch nicht mit dem Ziel einer späteren Beseitigung zwischengelagert werden, sondern mit dem Ziel einer späteren Verwertung. Landesrechtliche Möglichkeiten für die Normierung neuer Andienungspflichten für gefährliche Abfälle zur Verwertung sieht § 17 Abs. 4 Satz 1 KrWG nicht mehr vor. Soweit eine Ermächtigungsgrundlage für landesrechtliche Andienungspflichten von edel- und sondermetallhaltigen Abfällen geschaffen werden soll, müsste § 17 KrWG entsprechend angepasst werden. Einer solchen Anpassung und Wiedereinführung neuer landesrechtlicher Andienungspflichten stehen jedoch entgegen, dass bereits die bisherigen Andienungspflichten für gefährliche Abfälle zur Verwertung einen Fremdkörper innerhalb des Systems der privaten Entsorgungsverantwortung nach dem KrWG darstellen und als obsolet eingestuft wurden,

vgl. Frenz, in: Frenz/Fischer/Franßen, Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar, Stand: August 2018, KrWG, § 17 KrWG Rdn. 372 ff. m. w. N. zur Genese und zum Kompromisscharakter des § 17 Satz 2 KrWG sowie zu verfassungs- und europarechtlichen Vorgaben an Andienungspflichten.

3.5.2.7 Keine Pflicht zur Separation, Zwischenlagerung und Verwertung sondermetallhaltiger Fraktionen aus ElektroG oder AltfahrzeugV

Ferner lässt sich eine Pflicht zur Zwischenlagerung oder Verwertung sondermetallhaltiger Fraktionen nicht aus den derzeitigen Separations- oder Verwertungspflichten nach ElektroG und AltfahrzeugV ableiten. Insbesondere ist die Zwischenlagerung selbst nicht als (stoffliche) Verwertung nach ElektroG oder AltfahrzeugV anzusehen. Da keine zeitlichen Vorgaben über die Dauer des Verwertungsprozesses gesetzlich verankert sind, kann eine Verwertung nach Beendigung der Zwischenlagerung noch durchgeführt werden. Ferner kann der Gesetzgeber erwägen, stoffstromspezifische Separations- und Verwertungspflichten sowie Verwertungsquoten für sondermetallhaltige Fraktionen festzulegen (vgl. dazu im Detail bereits unter 2.3, insbesondere 2.3.2.3 und 2.3.2.4).

3.5.3 Zusammenfassung des rechtlichen Änderungsbedarfs

Zu beachten ist, dass sich eine Pflicht zur Zwischenlagerung sondermetallhaltiger Fraktionen nicht aus den derzeitigen Separationspflichten oder Recyclingquoten nach ElektroG und AltfahrzeugV ableiten lässt. Dafür müssten konkrete Verwertungspflichten für die sondermetallhaltigen Fraktionen rechtlich festgelegt werden (vgl. dazu bereits unter 2.3).

Sofern in Vorschriften zur Produktverantwortung, wie z. B. der WEEE-RL und dem ElektroG, zukünftig die Verwertung von Edel- und Sondermetallen gefordert wird (vgl. zu den Optionen des Gesetzgebers bereits im Detail unter 2.3.2.4), wird aufgrund der fehlenden derzeitigen Verwertungsmöglichkeiten zumindest für einige Sondermetalle eine Zwischenlagerung erforderlich sein.

Die deponierechtlichen Anforderungen an die Zwischenlagerung von sondermetallhaltigen Abfällen greifen ein und konkretisieren die immissionsschutzrechtlichen Pflichten, sobald Abfälle zur Verwertung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren bzw. Abfälle zur Beseitigung über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr zwischengelagert werden sollen. § 23 Abs. 1 Deponieverordnung („DepV“) fordert in diesen Fällen den Nachweis der anschließenden ordnungsgemäßen Entsorgung. Soweit Anlagen zur Verwertung von sondermetallhaltigen Abfällen noch nicht abschließend geplant bzw. gebaut sind, kann ein solcher Verwertungsnachweis durch den Betreiber des Zwischenlagers regelmäßig nicht beigebracht werden. Aus diesem Grund kann der Gesetzgeber neue gesetzliche Ausnahmeschriften in der Deponieverordnung schaffen, welche sondermetallhaltige Abfälle von dieser deponierechtlichen Nachweispflicht befreien.

Eine gesetzliche Bevorratungspflicht für bestimmte Edel- oder Sondermetalle wäre nur bei einer Änderung der europäischen und deutschen Rohstoffstrategie denkbar. Zudem müsste die Bevorratungspflicht dem Verhältnismäßigkeitsprinzip genügen.

Ein Langzeitzwischenlager für Sondermetalle kann sowohl von privaten als auch öffentlich-rechtlichen Trägern oder gemeinsam betrieben werden. Unterschiedliche Finanzierungsmodelle sind möglich. Soweit die Kurz- oder Langzeitlager als öffentliche Einrichtung betrieben werden sollten, kommt eine Finanzierung über Abfallgebühren in Betracht. Allerdings spricht gegen eine solche abfallgebührenrechtliche Lösung, dass für Hersteller und Vertreiber der sondermetallhaltigen Produkte kein Anreiz besteht, an der Optimierung von Verwertungstechniken und Produktdesign mitzuwirken, solange sie nicht an den Kosten für die Lagerung beteiligt werden. Ferner hat der Gesetzgeber die Möglichkeit, Pflichten, wie z. B. Finanzierungsverpflichtungen von Herstellern sondermetallhaltiger Produkte, wie beispielsweise NdFeB-Magneten, in einer separaten Rechtsverordnung oder einem separaten Gesetz zu regeln. Als Rechtsgrundlage einer Rechtsverordnung kommt § 25 KrWG in Betracht.

3.6 Bewertung der Optionen und Alternativen zur Zwischenlagerung

3.6.1 Zeitlicher Ablauf von Einlagerung und Auslagerung

Der Mengenaufbau im Lager wird verzögert beginnen, weil der Aufbau der Prozesse zur Anlieferung und die Gewinnung der Akteure für Lieferungen an das Lager Zeit in Anspruch nimmt. Weitere Verzögerungen können dadurch zustande kommen, dass das einzulagernde Material, etwa wegen des langsam wachsenden Rücklaufs demontagerechter Produkte, erst nach längerer Zeit in vollem Umfang zur Verfügung steht.

Solange keine Entnahmen aus dem Lager erfolgen, also mindestens bis zur Inbetriebnahme des aufzubauenden Verwertungsprozesses, wird die eingelagerte Menge wachsen. Nach der Inbetriebnahme wird der zeitliche Ablauf des Mengenabrufs durch den oder die Verwerter unter anderem von folgenden Faktoren abhängen:

- Von den Abgabekonditionen: Wenn der Verwerter das Material kostenlos oder zu geringen Kosten abrufen kann, wird er diese Möglichkeit eher in Anspruch nehmen.
- Von der Qualität des Materials: Je näher diese an den nur begrenzt vorhersehbaren Qualitätsanforderungen des Verwerter liegt und je verlässlicher sie eingehalten wird, desto größer wird sein Interesse sein.
- Von den Erlösen, die er für seine aus dem Material erzeugten Produkte erzielen kann
- Von den Konditionen, zu denen er Material aus anderen Quellen beziehen kann: Parallel zum Abruf der Lagermengen wird der Verwerter nach dem Start seines Geschäftes Material auch direkt von den Anfallstellen beziehen, die ihm dieses aufgrund des fehlenden Aufwandes für die Zwischenlagerung möglicherweise zu besseren Konditionen anbieten können.
- Von der Menge des Materials, das er aus anderen Quellen beziehen kann: Kann er hinreichende Mengen zu besseren Konditionen aus anderen Quellen beziehen, ist er auf das Langzeitzwischenlager als Materialquelle nicht angewiesen.

Der zeitliche Ablauf des Mengenabrufs durch den oder die Verwerter wird unter anderem von folgenden Faktoren abhängen:

Ein Verwerter, der einen Prozess aufgebaut hat, wird auf das Material keinen Ausschließlichkeitsanspruch erheben können, solange er das Lager nicht eigenverantwortlich aufbaut und betreibt. Eine wichtige kritische Frage ist daher, wie sich Anbieter- und Abnehmermärkte für das Material in den ersten Jahren des Anlagenbetriebs darstellen. Wenn diese sich gut entwickeln, werden sich auch andere Abnehmer für das eingelagerte Material interessieren. Dies können andere Verwerter sein oder auch Händler, die das Material weiterverkaufen, wobei dieser Weiterverkauf ins Ausland, an andere Abnehmer im Inland oder auch an den Hauptabnehmer im Inland erfolgen kann.

Einerseits kann es also sein, dass das Material dem Verwerter nur teilweise zur Verfügung steht, seine Anlagenauslastung also nach wie vor gefährdet ist. Andererseits ist es möglich, dass der Verwerter das Material gar nicht in Anspruch nehmen will, etwa aufgrund schlechter Marktlage oder weil seine Qualitätsanforderungen nicht erfüllt werden. Insofern ist mit der Langzeitzwischenlagerung zunächst sowohl ein Verfügbarkeitsrisiko für den Anlagenbetreiber als auch ein Absatzrisiko für den Betreiber des Langzeitzwischenlagers verbunden. Denkbar ist, dass der Anlagenbetreiber zugleich der Lagerbetreiber ist.

Im Gegensatz zu Lagern, die für die kontinuierliche Ein- und Auslagerung verwendet werden und einen mehr oder weniger stabilen Gleichgewichtszustand erreichen, muss das hier betrachtete Langzeitzwischenlager für eine maximale Einlagerungsmenge ausgelegt sein, die es aber voraussichtlich nur für einen relativ kurzen Zeitraum erreichen wird. Die maximale Lagerkapazität wird bei den hier betrachteten Abfällen bei mehreren Jahresmengen liegen.

Die folgende Tabelle zeigt eine Mengen- und Wertbetrachtung für die Zwischenlagerung der zu analysierenden Abfallströme unter der Annahme, dass des maximale Lagervolumen beim Fünffachen des Jahrespotenzials liegt.

Tabelle 94: Mengen- und Wertbetrachtung für die Zwischenlagerung der zu analysierenden Abfallströme; Annahme; jährlich angenommene Menge angesetzt mit Mittelwert aus Potenzial heute und 2017

	Neuwarenwert der Zielmetalle (Tsd. €/t)	Angenommene Menge / a (t)	Angenommene maximale Lagermenge (5 Jahresmengen) (t)	Neuwarenwert der maximalen Lagermenge (Tsd. €)
LCD-Display-Schichten (Indium)	483	200 (davon 6 t Indium)	1.000	14.490
Poliermittel (Cer)	4,5	400 (ca. 23% Ce)	2.000	2.070
Leuchtstoffe (SEE)	90	130 (ca. 15% SE)	650	8.775
NdFeB-Magnete (SEE)	32,7 (Wert Magnetmaterial)	977 (ca. 30% SEEE)	4.885	47.922

Die Lagerkosten über die Betriebsdauer des Zwischenlagers müssen auf die Gesamtmenge der eingelagerten Abfälle umgelegt werden, wobei die Lagerkapazität auf die Maximalmenge ausgelegt wird. Aufgrund der oben erläuterten Lageraufbau- und Lagerabbauzeiten ist die Lagerbetriebsdauer für den Durchsatz der fünf Jahresmengen deutlich höher. Für die hier betrachteten Abfälle wird von etwa 10 Jahren ausgegangen.

3.6.2 Kostenfaktoren der Zwischenlagerung

Kosten für Lagerhaltung trennen sich in Lagerkosten und Bestandskosten.

Lagerkosten umfassen:

- Kosten für Immobilie und Ausstattung
 - Grundstückkaufpreise / Pachtkosten (tendenziell günstiger je weiter von industriellen Hot-Spots entfernt, damit aber auch eher von der Verwertung entfernt)
 - Investitionen für Gebäude / Miete für Gebäude (entsprechend höher bei Spezialanforderungen)
 - Investitionen für Ausstattungsgegenstände
- Laufende Kosten
 - Energiebedarf (Licht, Heizung, Kühlung, Feuchtigkeitsüberwachung, etc.)
 - Personal (Lagerpersonal, Werkschutz)

Bestandskosten ergeben sich durch gebundenes Kapital, d.h. monetäre Werte, die eingelagert werden. Dazu wird die eingelagerte Ware zum Einkaufspreis zuzüglich zusätzlicher Bearbeitungskosten be-

wertet. Dieser Wert wird dann über die Lagerzeit in Form von Ware gebunden. Kalkulatorisch ist eine Einlagerungen betriebswirtschaftlich nur interessant, wenn der Verkaufspreis nach der Lagerung höher ist als der Einkaufspreis und die Differenz den marktüblichen Zins im gleichen Zeitraum übersteigt. Dabei werden aufgrund der laufenden Kosten die kalkulatorischen Bestandskosten immer höher, wodurch dem Warenwert zusätzlich die Kosten für die Lagerung zugeführt werden.

Diese Rechnung führt dazu, dass es betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, vor der Lagerung möglichst wenig Aufwand in die Behandlung der Waren zu investieren. Eine Trennung oder Sortierung ist mit Kosten verbunden, die dann mit einem kalkulatorischen Bestandwert „eingelagert“ werden. Die Bestandskosten werden so in die Höhe getrieben. Ein Vorabbehandlung ist nur dann sinnvoll, wenn die Lagerhaltung dadurch verbilligt werden kann. Um diese Rechnung großindustriell sinnvoll durchführen zu können, sind die Dauer der Lagerung sowie eine genaue Information über die Lageranforderung entscheidende Größen.

Diese Kostenlogik greift aber in den hier betrachteten Fällen nur begrenzt, da das einzulagernde Material aufgrund derzeit fehlender Verwertungsverfahren nur durch Einlagerung überhaupt nutzbar wird und gleichzeitig der Materialwert nicht demontierter Abfälle, etwa ganzer Motoren, derzeit verfügbare vergleichsweise hohe Werte binden würde.

Die mit der Errichtung eines Langzeitzwischenlagers verbundenen Lagerhaltungskosten können nicht fundiert abgeschätzt werden, solange wesentliche Fragen ungeklärt sind. So unterscheiden sich die Kosten erheblich für folgende Varianten

- Neu errichtetes freistehendes Lagergebäude mit Außenflächen, Warenannahme, Sozialräumen, Zaun etc.
- Neu errichtetes Lagergebäude in einer bestehenden Einrichtung, deren Büro- und Sozialräume, Umzäunung, Personal etc. mitgenutzt werden können
- Nutzung von Lagerfläche in einem bestehenden Lagergebäude

Die folgende Tabelle gibt eine orientierende Abschätzung der Investitionskosten für ein autonomes Lager mit 1.000 m² Lagerfläche, 100m² Nebenfläche (Büro, Sozialraum, Sanitärbereich, Abstellmöglichkeiten) und 660 m² Verkehrsfläche (10%) außen.

Tabelle 95: Grobe Abschätzung der Investitionskosten für ein Lager mit 1.000 m² Lagerfläche, 100m² Nebenfläche (Büro, Sozialraum, Sanitärbereich, Abstellmöglichkeiten) und 660 m² Verkehrsfläche (10%) außen

	Investitionskosten (Tsd. €)
Grundstückskosten (Durchschnittspreise baureifes Land (Industriegebiet) gemäß Destatis 2017: 27,78 €/m ²)	50.000
Gebäudekosten (Handels- einschließlich Lagergebäude Destatis 2016: 78 €/m ³ bzw. 674 €/m ²)	750.000
Bau Verkehrsfläche außen pauschal	50.000
Umzäunung und Sicherung pauschal	20.000
Lagerregale, Einrichtung für Nebenräume	25.000

IT und Software pauschal	10.000
Gabelstapler, Waagen, Kran etc. pauschal	30.000
Gebäudetechnik (Licht, Heizung, Lüftung...) pauschal	15.000
Planungskosten etc. pauschal	50.000
SUMME	1.000.000

Ohne Berücksichtigung von Nachnutzungsmöglichkeiten liegen die Kosten bei diesem Beispiel und einer angenommenen Nutzungsdauer von zehn Jahren bei mindestens etwa 100.000 Euro jährlich.

Die Kosten können von diesem Betrag je nach Anforderungen an das Lager, je nach technischer Ausstattung und je nach der örtlichen Situation erhebliche Abweichungen aufweisen. Die kalkulatorische Abschreibung hängt unter anderem ab von der zu erwartenden Betriebsdauer und der Möglichkeit einer Nachnutzung des Gebäudes.

Die Betriebskosten umfassen mindestens folgende Positionen

- Wareneingang incl. Kontrolle Inputqualität
- Warenausgang
- Kommunikation nach außen
- Reinigung
- Heizung und Lüftung
- Sicherheit und Überwachung
- Instandhaltung
- Software
- Lagerbehälter
- Buchhaltung und Rechnungswesen
- Weitere Verwaltung und Geschäftsführung

Je nachdem, ob das Lager über eigenes Personal verfügt oder von Personal mit anderen Aufgaben mitbetreut wird, je nach Lohnniveau am Standort, je nach Organisations-, Qualitätssicherungs-, Dokumentationspflichten und weiteren Aufgaben können sich diese Kosten erheblich unterscheiden.

Eine Größenordnung von etwa 100.000 € jährlich dürfte aber auch hier anzusetzen sein.

Die Gesamt-Lagerhaltungskosten für dieses fiktive Lager lägen damit bei mindestens etwa 200.000 € jährlich. Dieser Wert dürfte jedoch eher am unteren Ende des zu erwartenden Kostenkorridors liegen. Zudem können erhebliche zusätzliche Investitions- und Betriebskosten entstehen, die hier nicht berücksichtigt sind.

Ein maßgeblicher Kostenfaktor, der in dieser Darstellung nicht berücksichtigt ist, sind die Aufwände für die Bearbeitung des einzulagernden Materials, also etwa die Kosten für die Demontage einzulagernder NdFeB-Magnete aus Geräten.

4 Ökologisch optimaler Rückgewinnungsgrad von Edel- und Sondermetallen

Das Arbeitspaket zielt auf einen Vergleich eines ökologisch optimalen mit technisch realisierten bzw. absehbar realisierbaren Rückgewinnungsgraden. Basierend auf einer wissenschaftlichen Betrachtung sollen Kriterien zur Abschätzung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades abgeleitet und exemplarisch auf ausgewählte edel- und sondermetallhaltige Abfallströme angewendet werden. Auf diese Weise soll eine Grundlage geschaffen werden, um Anforderungen an zu erreichende Rückgewinnungsgrade für die Berücksichtigung in Rechtsvorschriften der Kreislaufwirtschaft vorschlagen zu können.

Der Rückgewinnungsgrad selber ist das Produkt einer Abfolge von Ausbeuten über die Schritte der Recyclingkette von der Sammlung und Erfassung der Abfallprodukte über die Vorbehandlung (z.B. Demontage) und Aufbereitung zur Auftrennung komplexer Fraktionen bis hin zur Verwertung, also der Rückgewinnung marktfähiger Zielmetalle oder Zielmetallverbindungen.

4.1 Bewertung ökologischer Aufwand

Bei der Abschätzung des ökologischen Aufwands ist eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Vorhabens können nur Wege zu einer groben Abschätzung entwickelt werden. Dies zumal das zu entwickelnde Werkzeug mit vertretbarem Aufwand anwendbar sein soll.

Detaillierte quantitative Analysen bedürfen nicht nur ausführlicher z.B. ökobilanzieller Untersuchungen, sondern sie sind zudem nur im Zusammenhang mit den für die Rückgewinnung eingesetzten konkreten Verfahren möglich. Nachfolgend werden mögliche Ansätze skizziert, die „(einigermaßen) richtungssichere Aussagen“ zur Bewertung der untersuchten Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesse erlauben könnten.

- **Ansatz A) Treibhauseffekt:** In der Ökobilanzierung werden Wirkungsindikatoren zur Beurteilung von Umweltrisiken definiert. Dazu zählen etwa der Treibhauseffekt, die Versauerung, der stratosphärische Ozonabbau, die fotochemische Oxidantienbildung, die aquatische und terrestrische Eutrophierung oder der Ressourcenverbrauch.

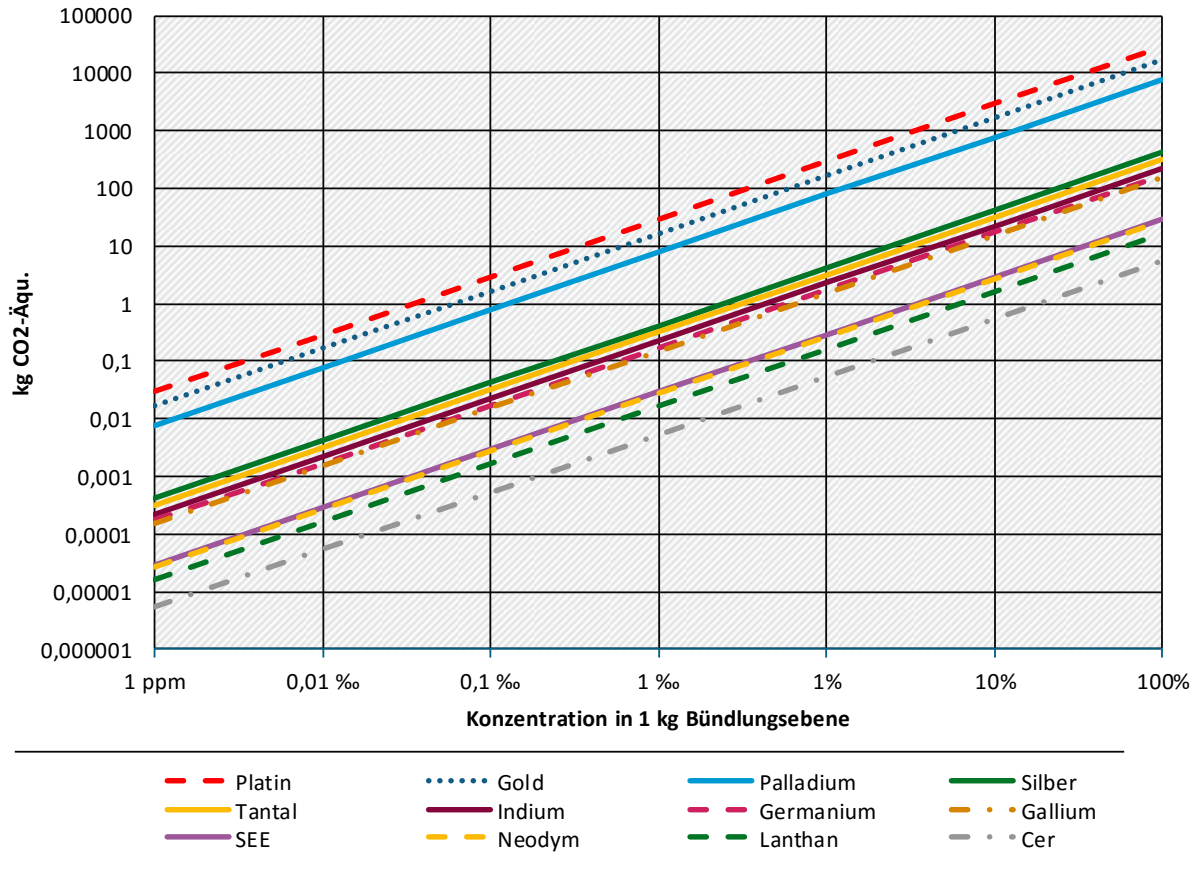
Im Gegensatz zu den meisten anderen Wirkungsindikatoren sind für viele Primärrohstoffe wie auch eine Reihe von Sekundärrohstoffen Informationen zu Treibhauspotenzialen in der Fachliteratur publiziert, in öffentlich verfügbaren Material-Bibliotheken wie z.B. der Datenbank „ProBas“ (einem Webportal des Umweltbundesamtes, das zu einer Bibliothek für Ökobilanzdaten führt) frei zugänglich bzw. in kommerziellen Datenbanken wie z.B. ecoinvent, abrufbar. Der Treibhauseffekt – oder Carbon Footprint – quantifiziert die Emissionen an CO₂-Äquivalenten entlang der Wertschöpfungskette eines Produktes oder Verfahrens. CO₂-Äquivalentfaktoren beschreiben, wie viel ein Treibhausgas zum Klimawandel beiträgt. Als Vergleichswert dient Kohlendioxid. Weitere Gase mit Treibhausgas-Potential, wie u. a. Methan und Lachgas, werden bei der Bilanzierung entsprechend ihrer Klimawirksamkeit berücksichtigt.

Der Treibhauseffekt ist ein guter Leitparameter für die Abschätzung des ökologischen Potenzi- als (ökologischer Rucksack Neeware) in einem Abfallstrom und auch in zu verwertenden Einzelprodukten. Abbildung 24 zeigt, dass beispielsweise eine Konzentration von 1 ‰ Platin in 1 kg gebündeltem Stoffstrom einem Carbon Footprint von fast 30 kg CO₂-Äquivalenten entspricht. Hingegen entspricht eine Konzentration von 10 ‰ Cer in 1 kg gebündeltem Stoffstrom treibhausgaswirksamen Emissionen in Höhe von weniger als 1 kg CO₂-Äquivalenten.

Abbildung 24: Carbon Footprint verschiedener Edel- und Sondermetalle im globalen Marktmix in Abhängigkeit von deren Konzentration in der Bündelungsebene.

Carbon Footprint (Global Warming Potenzial)

Carbon Footprint für die Bereitstellung des Zielelementes im globalem Marktmix



Quelle:ecoinvent 2017; PLoS 2014

In der Regel resultieren aus dem Recycling von Metallen Treibhausgase, die z.B. auf die Bereitstellung von Energie und Hilfs- und Betriebsstoffen oder auf zusätzliche Transporte zurückzuführen sind. Dem stehen vermiedene Treibhausgase gegenüber, die hauptsächlich aus der vermiedenen Herstellung von Primärrohstoffen inklusive vermiedener Transporte und vermiedener Energieverbräuche resultieren. Auch zu den Treibhauspotenzialen der derzeit betriebenen Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesse sind oft Daten aus Datenbanken erhältlich.

Solche Werte fehlen jedoch insbesondere für sehr spezielle, neue oder erst zum Labormaßstab entwickelte Verfahren, und eine näherungsweise Abschätzung der Treibhauseffekte ist ohne klare Definition der Auslegung des Prozesses und seiner Randbedingungen kaum fundiert möglich.

Der Treibhauseffekt als Umweltwirkungskategorie mit recht guter Datenlage ist daher als Leitparameter zur einfachen Quantifizierung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades nicht geeignet.

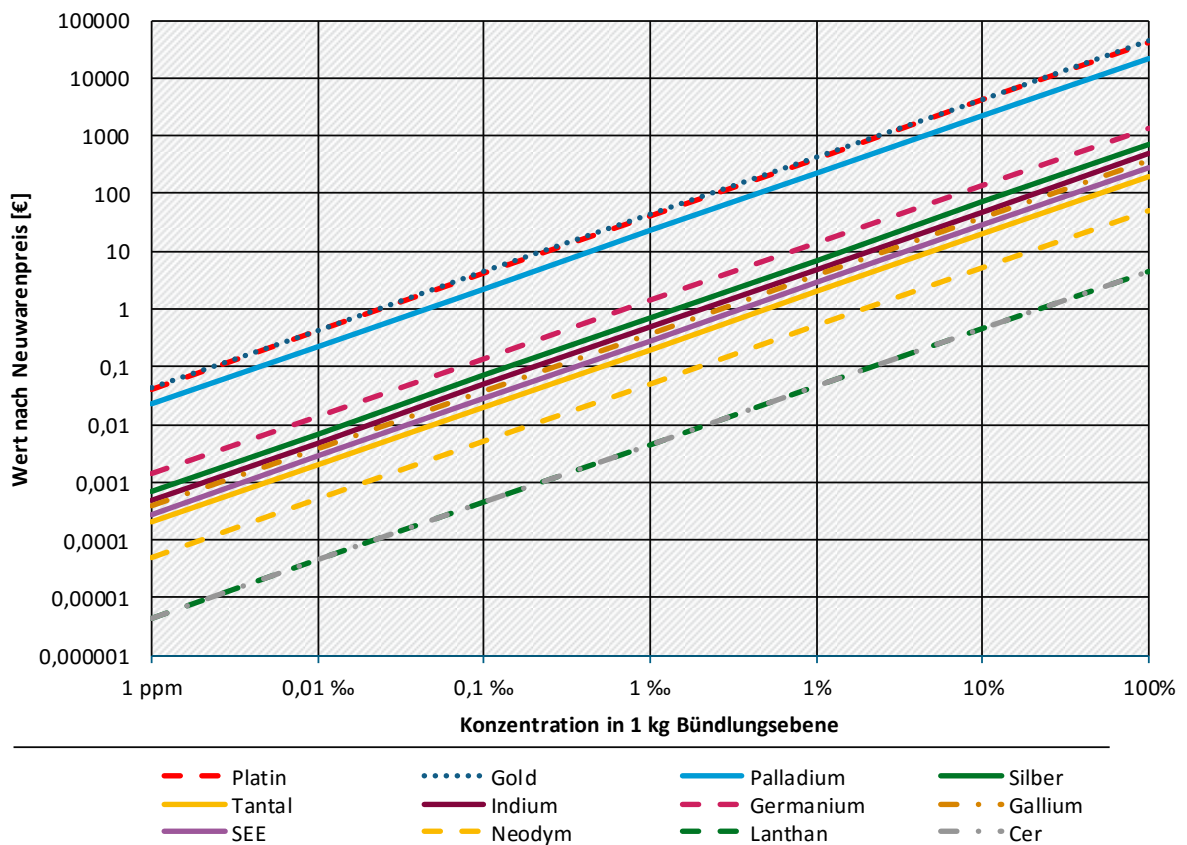
- **Ansatz B) Kostenvergleich:** Kosten bilden Umwelteffekte nur sehr eingeschränkt ab. Allerdings können Kostengrößenordnungen durchaus bei der orientierenden Einschätzung von Umwelteffekten helfen. Hohe Kosten stehen meist für großen Aufwand und Aufwand ist in der Regel mit Umweltbelastungen verbunden.

Mit der Erzeugung von Sekundärrohstoffen durch Recyclingprozesse sind Kosten verbunden, wie z.B. für den Bedarf an Energie und Hilfsstoffen, für die Aufbereitung der Abfälle, für Maschinen, Personal, Unterhalt und Instandhaltung etc. Diesen Prozesskosten stehen Marktpreise für Primärrohstoffe gegenüber, die durch die Sekundärrohstoffe substituiert werden. Marktpreise können in ihrer Größenordnung durchaus als Indikator für die mit der Gewinnung eines Metalls verbundenen Umweltbelastungen dienen. Sie haben zudem den Vorteil, dass Daten zu Rohstoffpreisen in der Regel problemlos zugänglich sind. Zum Ausgleich von Preisschwankungen sollte mit Mittelwerten über mehrere Jahre gearbeitet werden. In Abbildung 25 sind die Marktwerte der Zielmetalle – berechnet aus Mittelwerten der Neuwarenpreise der Jahre 2012 bis 2016 (USGS 2017) – im Verhältnis zu ihrer Konzentration in der Bündelungsebene aufgetragen. Die Unterschiede sind erheblich. So liegt der Marktwert der enthaltenen Edelmetallmenge bei einer Konzentration von 0,1 Promille Gold oder Platin in einem kg gebündeltem Stoffstrom bei mehreren €. Hingegen entsprechen selbst 10 % Lanthan oder Cer, also ein um drei Größenordnungen höherer Anteil in einem kg gebündelten Stoffstroms einem Neuwarewert von deutlich unter einem Euro.

Abbildung 25: Wert nach Neuwarenpreis für verschiedene Konzentrationen der Zielelemente

Wert Konzentration

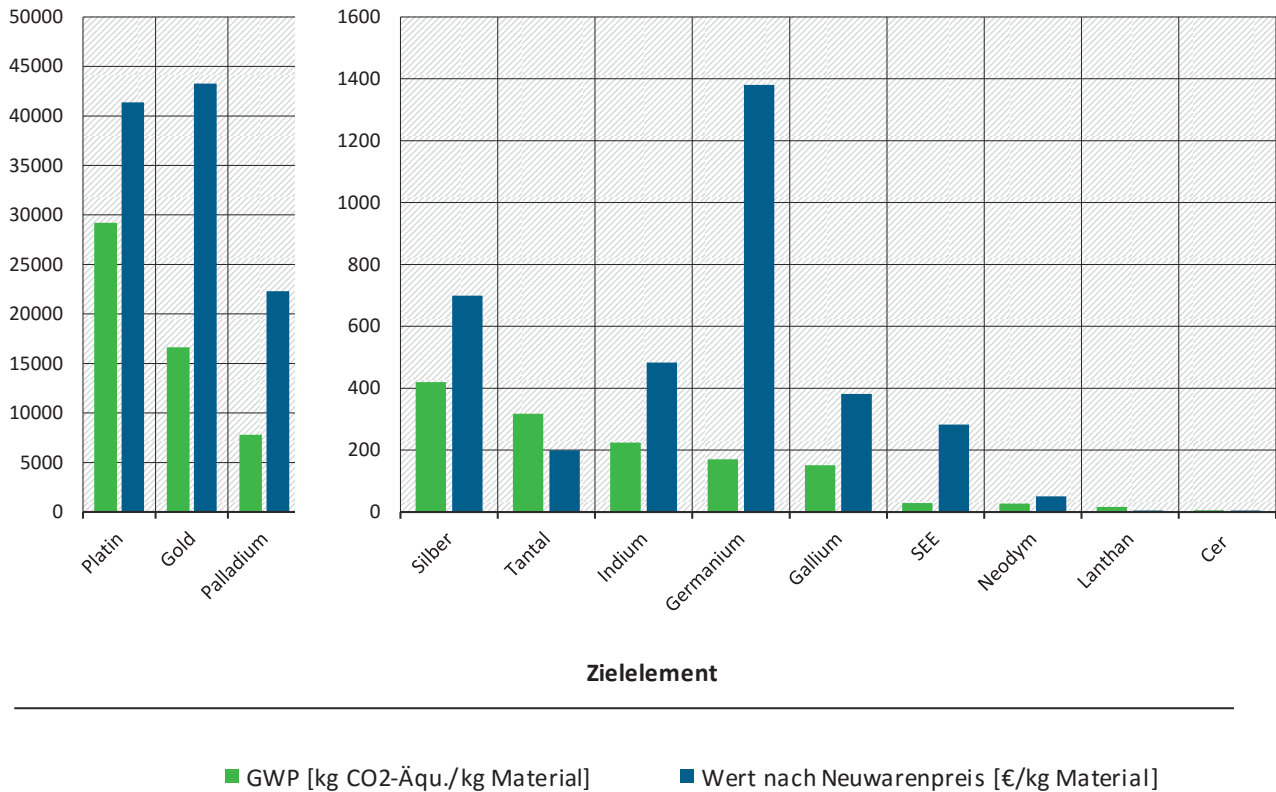
Wert-Konzentration des Zielelementes in der Bündelungsebene



Quelle: Neuwarenpreise nach USGS 2017

Abbildung 26 zeigt die recht gute Korrelation der Neuwarenpreise und Treibhauseffekte von Metallen.

Abbildung 26: GWP und Neuwarenpreise für die Bereitstellung eines Teils der Zielelemente



Quelle: GWP nach ecoinvent 2017 und PLoS 2014; Neuwarenpreise nach USGS 2017

Der Kostenansatz ist insbesondere im Falle ansonsten schlechter Datenlage eine pragmatische und einfache Lösung. Langjährige Erfahrung mit Ökobilanzen und Kostenanalysen haben immer wieder bestätigt, dass die ökologische Treffsicherheit von Kosten für orientierende Einschätzungen meist recht gut ist.

Für die derzeit betriebenen Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesse sind Kosten meist nur mit größerem Aufwand abschätzbar, allerdings sind zum Teil Marktpreise für die Verarbeitung verfügbar, aus denen die Kosten näherungsweise abgeleitet werden können. Marktpreise fehlen jedoch insbesondere für sehr spezielle, neue oder erst zum Labormaßstab entwickelte Verfahren und eine näherungsweise Abschätzung der Kosten ist ohne klare Definition der Auslegung des Prozesses und seiner Randbedingungen kaum fundiert möglich.

Auch Kosten sind daher als Leitparameter zur einfachen Quantifizierung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades nicht geeignet.

- Ansatz C) Kritikalität:** Die Kritikalität ist ein Parameter zur Messung der technologischen und wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffs. Die Rohstoffkritikalität wird üblicherweise in den zwei Hauptdimensionen Versorgungsrisiko und Verletzbarkeit (Vulnerabilität) bewertet. Das Versorgungsrisiko beschreibt die Höhe des Risikos, dass es zu Versorgungsengpässen mit einem Rohstoff kommen kann, während die Verletzbarkeit das Maß der Anfälligkeit der Wirt-

schaft im Falle einer Verknappung beschreibt. Da die Kritikalität keinen direkten Umweltbezug hat, ist sie als Leitparameter ebenfalls nicht geeignet.

- **Ansatz D) Nutzwertanalyse:** Die Nutzwertanalyse bietet die Möglichkeit, eine überschaubare Anzahl auch an nicht oder nur teilweise quantifizierbaren Kriterien zu einer Bewertung zusammenzuführen. Nutzwerte sind eine nachvollziehbare Grundlage für die fundierte Entscheidung zwischen mehreren Optionen. In der Nutzwertanalyse wird die Wichtigkeit (Gewichtung) eines Parameters von seiner Bewertung getrennt. Es wird also zunächst festgelegt, welche relative Wichtigkeit Faktoren wie z.B. dem Treibhauseffekt oder der Kritikalität beigemessen wird. Dann erfolgt für jeden Faktor in jeder zu bewertenden Option isoliert die Bewertung. Durch Multiplikation von Gewichtung und Bewertung und Summierung über alle Parameter ergibt sich der Nutzwert.

Mit der Nutzwertanalyse können sowohl quantitativ bewertbare Faktoren (z.B. der Treibhauseffekt) als auch aufgrund der Datenlage nur qualitativ bewertbare Faktoren berücksichtigt werden, also z.B. human- und ökotoxische Wirkungen oder Kritikalität.

Auch wenn die in sich schlüssige Definition der Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für eine Nutzwertanalyse mit einigem Aufwand verbunden ist, erscheint Ansatz D als vor allem deshalb als besser geeignet weil hier mehrere Parameter zusammengeführt werden können, diese aber nicht unbedingt quantifiziert werden müssen. Die Methode ist auf unterschiedliche Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesse anwendbar und gerade für Abwägungsentscheidungen im Falle von Zielkonflikten erfahrungsgemäß gut geeignet.

Tabelle 96 zeigt an einem fiktiven Beispiel, dass der Rückgewinnungsgrad letztendlich eine Abfolge von Ausbeuten über die Recyclingkette ist.

Tabelle 96: Ausbeuten fiktiver IST-Prozessketten (Fall A - D)

Prozessschritte in der Recyclingkette	Fall A	Fall B	Fall C	Fall D
Erfassung	0%	50%	50%	50%
Aufbereitung/ Vorbehandlung	0%	90%	50%	50%
Verwertung	90%	95%	95%	0%
Ausbeute gesamt	0%	43%	24%	0%

Dies verdeutlicht, dass es nicht zielführend ist, die Zielgröße Rückgewinnungsgrad pauschal zu betrachten. Vielmehr sollten diejenigen Stellschrauben identifiziert und analysiert werden, welche die einzelnen Ausbeuten der Prozessschritte über die Recyclingketten am stärksten beeinflussen.

Kriterien für eine Nutzwertanalyse

Tabelle 97 zeigt eine Auswahl an Faktoren, welche die Kennzahlen einer Nutzwertanalyse bezogen auf die Aufgabenstellung in diesem Projekt beschreiben könnten.

Tabelle 97: Beispielhafte Faktoren, die die Kennzahlen einer Nutzwertanalyse beschreiben können

Kennzahlen	Faktoren
Ökologie: GWP (auch, ADP, CTU ¹ , etc.)	Transporte zur Vorbehandlung, Aufbereitung und Verwertung (Belastung) Energie für Vorbehandlung, Aufbereitung und Verwertung (Belastung) Stoffe/Materialien für Vorbehandlung, Aufbereitung und Verwertung (Belastung) Systemnutzen für substituiertes Primärmaterial (Entlastung)
Kritikalität	Versorgungsrisiko Verletzbarkeit/Vulnerabilität
Technische Aspekte	Aufwand für Beseitigung von Rest- und Gefahrstoffen nach Vorbehandlung, Aufbereitung und Verwertung Aufwand für Emissionsminderungsmaßnahmen (Luft/Wasser) während Aufbereitung und Verwertung Aufwand für die weitere Verarbeitung von Output-Fractionen aus der Verwertung Ausbeute an Nicht-Ziel-Materialien (im Vergleich zur Ist-Situation) bei Verwertung
Ökonomie: Kosten (als Indikator für den wirtschaftlichen Aufwand)	Prozesskosten Sammlung (Belastung) Prozesskosten Vorbehandlung (Belastung) Prozesskosten Aufbereitung (Belastung) Prozesskosten Verwertung (Belastung) Finanzieller Nutzen aus der Vermarktung des Recyclingmaterials (Entlastung)

¹) GWP = Global Warming Potential = Carbon Footprint
 ADP = Abiotic Depletion Potential = Depletion of mineral, fossil and renewable resources
 CTU = Comparative Toxic Unit for Humans = Human toxicity

Prinzipiell ist es möglich, die Faktoren aus Tabelle 97 zu jedem Abfallstrom, zu jedem Metall wie auch zu jedem Schritt der Recyclingkette zu quantifizieren und Kennzahlen über die Verhältnisse von Aufwand (Belastungen) und Nutzen (Entlastungen) zu berechnen:

$$Kennzahl = \sum \text{Aufwand (Belastungen)} - \sum \text{Nutzen (Entlastungen)}$$

Eine Gewichtung und Zusammenfassung der Kennzahlen, z.B. entsprechend der Methode der Nutzwertanalyse, würde für die Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesse zu einem Nutzwert führen. Dieser Nutzwert sagt aber wenig über den optimalen Rückgewinnungsgrad aus, da den meisten Parametern – wenn überhaupt – nur jeweils ein Einzelwert für die Ausbeute eines bereits im Einsatz befindlichem Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesses (IST-Situation) zugrunde liegt.

Die nähere Betrachtung zeigt jedoch, dass es aufgrund sehr komplexer Zusammenhänge mit großem Aufwand verbunden wäre, reale Faktoren in Abhängigkeit von verschiedenen Ausbeuten (= Rückgewinnungsgraden) zu ermitteln. Die Anhängigkeit der Faktoren - und damit der Kennzahlen - von den

Rückgewinnungsgraden kann die gesamte Spannbreite von linear bis hoch exponentiell annehmen. In Tabelle 98 sind am Beispiel einer fiktiven Recyclingkette unterschiedliche Abhängigkeiten dargestellt.

Tabelle 98: Unterschiedliche Abhängigkeiten der Kennzahlen vom Rückgewinnungsgrad am Beispiel einer fiktiven Recyclingkette

Prozessschritt	Ökonomie	Ökologie		Ausbeute an Nicht-Ziel-Materialien
	Kosten	GWP ¹⁾	ADP ²⁾	
Erfassung	hoch exponentiell	schwach exponentiell	schwach exponentiell	linear
Aufbereitung	hoch exponentiell	nahezu linear	nahezu linear	linear
Vorbehandlung	hoch exponentiell	nahezu linear	nahezu linear	linear
Verwertung	hoch exponentiell	hoch exponentiell	hoch exponentiell	exponentiell (fallend)

¹⁾ GWP = Global Warming Potential = Carbon Footprint

²⁾ ADP = Abiotic Depletion Potential = Depletion of mineral, fossil and renewable resources

Wie Tabelle 98 zeigt, wird in diesem fiktiven Beispiel davon ausgegangen, dass die Kosten für die Erfassung der Abfallfraktionen oberhalb eines gewissen Erfassungsgrades aufgrund des großen Aufwands für das Erreichen noch höherer Sammelquoten, z.B. für eine wesentlich komfortablere hausnahe Erfassung in Form von Holsystemen mit Abholung auch kleinster Einzelmengen, exponentiell ansteigen, wogegen die ökologischen Faktoren für diesen Prozessschritt mit steigendem Rückgewinnungsgrad nur als schwach exponentiell steigend eingestuft werden, weil die absoluten Effekte auf die Ausbeute immer geringer werden.

Auch für die Aufbereitung/Vorbehandlung etwa in Form einer manuellen oder teilautomatisierten Zerlegung wird angenommen, dass die Kostensteigerung mit steigendem Rückgewinnungsgrad hoch exponentiell ausfällt. Ausschlaggebend hierfür ist wieder, dass sehr große Ausbeuten in der Regel nur mit extremem Aufwand realisiert werden können, weil hierzu z.B. kleinste Einzelmengen sehr schwer zugänglicher Bauteile separiert werden müssen. Für die ökologischen Faktoren kann insbesondere bei rein manueller Demontage eine nahezu lineare Steigerung angenommen werden.

Für die Verwertung wird dagegen sowohl für die Kosten als auch für die ökologischen Faktoren von einer hoch exponentiellen Steigerung mit zunehmenden Rückgewinnungsgrad ausgegangen, da etwa im Falle nasschemischer Prozesse für höhere Ausbeuten oft zusätzliche Prozessstufen oder mehrere Durchläufe bestehender Prozessstufen notwendig sind.

Alle Funktionen, die die Abhängigkeiten der Kennzahlen vom Rückgewinnungsgrad - ob mathematisch ermittelt (z.B. $y = x^2$) oder auf Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt (z.B. für Rückgewinnungsgrade von 0% bis 50% jeweils Verdopplung der Emissionen pro 10% Steigerung, danach Erhöhung der Emissionen auf das 2,2-fache bis 4-fache pro 10% Steigerung) – beschreiben, benötigen einen Basiswert. In dieser Studie könnte dies ein Kosten-, Emissions-, Aufwendungs- oder Zielgrößenwert bei einer bekannten Ausbeute eines bereits im Einsatz befindlichen Behandlungs- und Rückgewinnungsprozesses (IST-Situation), oder - wenn noch kein Prozess technisch umgesetzt ist - eine Abschätzung sein. Die Basiswerte für die Ausbeuten an Nicht-Ziel-Materialien könnten aus Rechercheergebnissen entnommen oder basierend auf diesen abgeschätzt werden. Die Prozesskosten könnten ebenso grob in realistischen Größenordnungen angenähert, qualitativ bewertet und mit Neuwarenwerten (siehe Abbildung 26) zu Gesamtkosten verrechnet werden.

Die so möglicherweise ermittelbaren Abhängigkeiten der Kennzahlen vom Rückgewinnungsgrad in einem Werkzeug zusammenzuführen, ist gleichwohl eine große Herausforderung. Denkbar wäre hierzu der Aufbau einer Matrix, in der rein qualitative Aufwands- und Emissionssteigerungen bei steigendem Rückgewinnungsgrad (oder auch Aufwands- und Emissionsverringerungen) auf Basis der Startwerte sowie von abzuschätzenden Funktionen berechnet werden. Für die Interpretation der Ergebnisse könnte eine graphische Darstellung in Form von Regressionskurven möglich sein, die aus den spezifischen Belastungs-Kurven der Prozessschritte gemittelt werden.

Die Gefahr einer solchen Herangehensweise besteht jedoch darin, dass trotz immensem Daten- und Kalkulationsbedarf und großem Aufwand für die Anwendung auf jede konkrete Fragestellung, wenig belastbare Ergebnisse erzielt werden, die Genauigkeit nur vorspiegeln.

Um dies zu überprüfen wird dieser Ansatz an einem Beispiel durchgespielt.

4.1.1 Erläuterung an einem Beispiel

Nachfolgend wird die zuvor skizzierte Vorgehensweise zur Bewertung des ökologischen Aufwands beispielhaft am edelmetallhaltigen Abfallstrom *Leiterplatten aus Altfahrzeugen* veranschaulicht.

Die in den derzeit erfassten Altfahrzeugen enthaltene Gesamtmenge an Leiterplatten wird auf 500 t/a mit einer steigenden Tendenz für zukünftige Mengen abgeschätzt. Die Zielmetallgehalte der Leiterplatten werden wie folgt angenommen:

- 0,016 Gew.-% Gold
- 0,061 Gew.-% Silber
- < 0,01 Gew.-% Palladium
- < 0,001 Gew.-% Platin

Basierend auf den Neuwarenpreisen der Zielmaterialien (vgl. Abbildung 26) wird das Wertpotenzial der Gesamtmenge Leiterplatten mit ca. 4,77 Mio. € abgeschätzt. Allerdings wird derzeit aufgrund der nahezu vollständig fehlenden Separation der Fahrzeugelektronik und aufgrund von Materialverlusten entlang der Verwertungskette nur ein geringer Teil dieses Potenzials genutzt. Andererseits ist das theoretische Gesamtpotenzial größer weil nur ein Teil der Altfahrzeuge in Deutschland verwertet wird. Die Erfassung ist also unvollständig.

Zur Abschätzung des ökologischen Nutzens wird der Treibhauseffekt (GWP⁴²) herangezogen. Mit der Substitution äquivalenter Primärrohstoffmengen im globalen Marktmix können durch die wiedergewonnenen Mengen an Zielmaterialien treibhauswirksame Emissionen in Höhe von ca. 1,92 Mio. kg CO₂-Äquivalenten sowie der Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von 28 Mio. MJ vermieden werden.

Zur Abschätzung des optimalen Rückgewinnungsgrads sind zunächst spezifische Belastungs-Kurven der Prozessschritte (Erfassung, Demontage, Aufbereitung, Verwertung), d.h. die Abhängigkeiten ausgewählter Kennzahlen vom Rückgewinnungsgrad, zu ermitteln. Sowohl dem wirtschaftlichen Wertpotenzial als auch dem ökologischen Nutzen stehen Aufwände für den Rückgewinnungsprozess gegenüber. Wie oben dargelegt, sind die Aufwände abhängig vom Rückgewinnungsgrad. Innerhalb der Prozessschritte ist diese Abhängigkeit unterschiedlich ausgeprägt, von linear bis hoch exponentiell. Nachfolgend werden Annahmen beschrieben, die für den Abfallstrom Leiterplatten aus Altfahrzeugen als erste näherungsweise Basis für die unterschiedlichen Abhängigkeiten der beiden Kennzahlen Kosten und GWP vom Rückgewinnungsgrad dienen können.

⁴² Global Warming Potential

Erfassung

Zur Steigerung der erfassten Mengen sind im Wesentlichen zusätzliche regulatorische und Vollzugsmaßnahmen erforderlich. Der ökologische Aufwand dürfte als gering angenommen werden können. Die Kosten können je nach Maßnahme erheblich sein, so etwa wenn dem Letztbesitzer bei der Abgabe des Fahrzeugs eine Vergütung in steuerungswirksamer Höhe gezahlt werden sollte. Kosten und ökologischer Aufwand für diese übergeordneten Maßnahmen werden als außerhalb des hier analysierten Bereichs betrachtet. Sie sind zudem ohnehin kaum fundiert abschätzbar.

Für die Erfassung der Altfahrzeuge steht ein ausreichend dichtes Netz an Annahmestellen zur Verfügung, die noch erhebliche ungenutzte Kapazitäten aufweisen. Änderungen an der Logistik-Struktur sind somit nicht erforderlich. Der Logistik-Aufwand für zusätzlich erfasste Fahrzeuge ist damit in erster Linie von der Zahl der Fahrzeuge abhängig, nicht jedoch vom Erfassungsgrad. Erst bei erheblichen Änderungen der Anzahl der pro Annahmestelle erfassten Fahrzeuge kommen für den Transport zum Demontagebetrieb (sofern dieser nicht selbst die Altfahrzeuge annimmt) größere bzw. kleinere Transportmittel mit entsprechend höheren bzw. niedrigeren Kosten und Umweltbelastungen je transportiertem Altfahrzeug zum Einsatz.

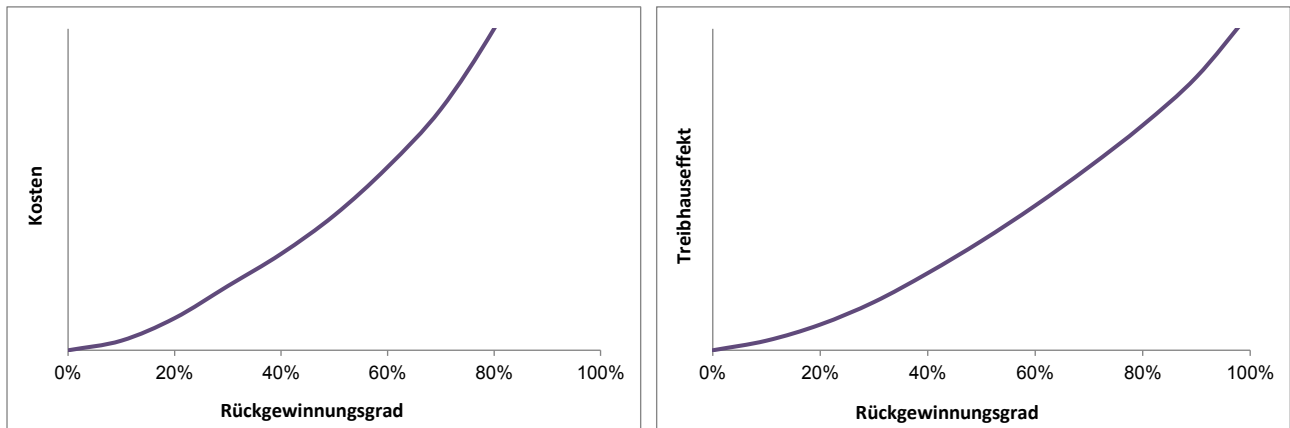
Der ökonomische und ökologische Aufwand ist damit näherungsweise linear abhängig vom Erfassungsgrad. Dies gilt auch bei im Vergleich zur heutigen Situation niedrigeren Erfassungsquoten, da die Annahmestellen großenteils unabhängig vom Fahrzeugrücklauf betrieben werden, solange sie durch andere Aufgaben (Fahrzeugverkauf, Fahrzeugreparatur) hinreichend ausgelastet sind. Erst bei sehr niedrigen Erfassungsquoten muss von einer deutlichen Ausdünnung des Netzes mit dann größeren Transportentfernungen für die zu verwertenden Altfahrzeuge ausgegangen werden.

Die ökologischen und ökonomischen Mehraufwände, die nicht linear vom Erfassungsgrad abhängig sind, können aber an dieser Stelle vernachlässigt werden weil sie auf die Gesamtheit der dann zusätzlich dem Recycling zugeführten Mengen auch anderer Materialien umgelegt werden müssen, die bei Export der Altfahrzeuge nicht verwertet werden.

Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass durch eine Steigerung der Stückzahl erfasster Altfahrzeuge nicht nur die hier betrachteten Edelmetalle sondern auch weitere, bei Export der Altfahrzeuge nicht verwertete Materialien zusätzlich gewonnen werden.

Zusammengefasst ist für den Prozessschritt Sammlung näherungsweise eine nahezu lineare Belastungskurve für die logistischen Kosten und für die treibhauswirksamen Emissionen zu erwarten (vgl. Abbildung 27).

Abbildung 27: Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Erfassung



— Aufwand Erfassung

Demontage

Derzeit finden Demontage und Recycling von Leiterplatten aus Fahrzeugelektronik nur in sehr geringem Umfang statt. Es wird daher näherungsweise davon ausgegangen, dass der Rückgewinnungsgrad durch Demontage bei null Prozent liegt.

Ferner wird davon ausgegangen, dass 20 % der in der Fahrzeugelektronik enthaltenen Edelmetalle bereits heute im Rahmen des Schredderprozesses zurückgewonnen werden. Das zusätzlich durch Demontage erzielbare Potenzial liegt somit bei 80% des Gesamtpotenzials der erfassten Altfahrzeugmenge.

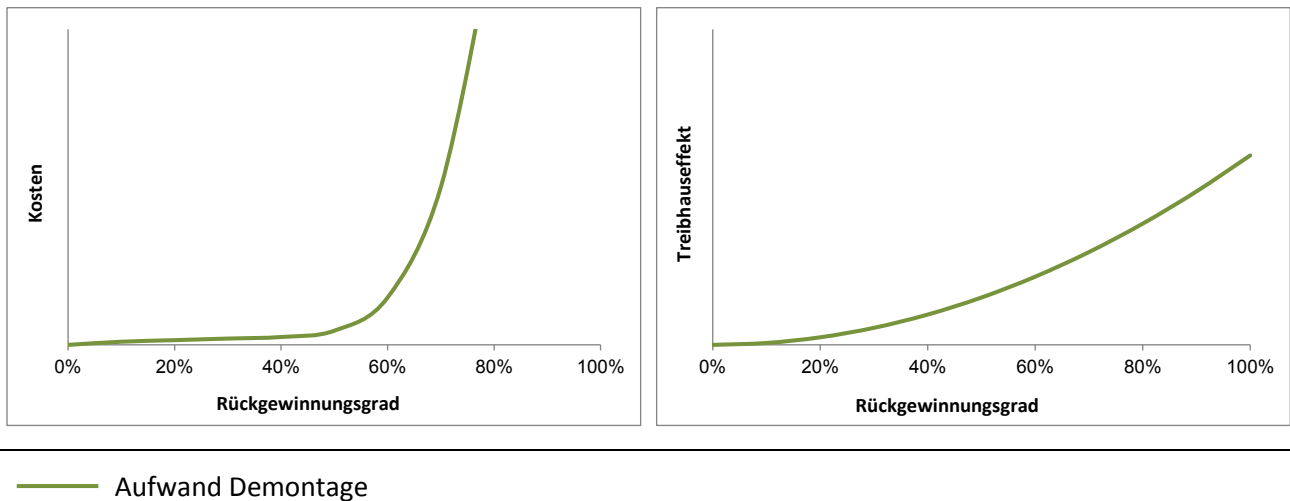
Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einer niedrigen Rückgewinnungsquote lediglich Fahrzeugelektronik mit großen Leiterplattengehalten, die zudem die gut zugänglich ist, aus den Altfahrzeugen entfernt wird. Eine solche Vorgehensweise ist mit vergleichsweise niedrigen spezifischen Personalkosten (Kosten pro Menge der mit der Elektronik separierten Leiterplatten) verbunden. Da die Entnahme manuell mit Hilfe einfacher Werkzeuge erfolgt, sind treibhauswirksame Emissionen nur in sehr geringer Größenordnung durch den Einsatz elektrischer oder pneumatischer Werkzeuge zu erwarten.

Mit jeder weiteren Steigerung der Rückgewinnungsquote müssen immer kleinere und/oder schlechter zugängliche Fahrzeugelektronik-Komponenten aus den Altfahrzeugen ausgebaut werden bis schließlich auch kleinste Einheiten mit sehr geringen Leiterplattengehalten und entsprechend geringem ökologischen und wirtschaftlichen Wert je separierter Einheit ausgebaut werden. Die spezifischen Kosten der Demontage werden daher als stark exponentiell steigend angenommen. Die Treibhausgasemissionen durch Werkzeuggebrauch werden als leicht exponentiell steigend angenommen. Die Umweltbelastungen durch die Bereitstellung der menschlichen Arbeitskraft (Ernährung, Kleidung, Wohnung etc.) werden, wie in der Ökobilanzierung üblich, nicht berücksichtigt.

Für den Transport der Fahrzeugelektronik-Komponenten von der Demontage zur weiteren Aufbereitung werden Lkw eingesetzt. Der damit verbunden Treibstoffverbrauch sowie die Emissionen aus dem Verbrennungsprozess können näherungsweise als linear abhängig vom Rückgewinnungsgrad angenommen werden.

Zusammengefasst ist für den Prozessschritt Demontage eine exponentiell stark steigende spezifische Belastungskurve für die Demontageskosten zu erwarten, wogegen die spezifische Belastungskurve für die treibhauswirksamen Emissionen auf sehr geringem Niveau eher exponentiell schwach bis nahezu linear ansteigen würde (vgl. Abbildung 28).

Abbildung 28: Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Demontage



Aufbereitung

Bei der Aufbereitung werden aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten Leiterplatten abgetrennt. Hier wird angenommen, dass dies durch eine Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke geschieht. Bei zu geringer Zerkleinerungswirkung kommt es zu Verlusten an Leiterplattenmaterial, das nicht vollständig von anderem Material (z.B. Aluminiumgehäuse) abgelöst wurde. Je stärker andererseits die Zerkleinerung in der Prallmühle ist, desto größere Verluste von Leiterplattenmaterial über Staubfraktionen oder nicht mehr sortierbare kleinere Leiterplattenpartikel sind zu erwarten. Zu starke Zerkleinerung ist daher ebenfalls zu vermeiden und ein optimaler Verarbeitungspunkt einzustellen.

Je genauer (d.h. vor allem kleinteiliger) die anschließende Aussortierung der Leiterplattenbruchstücke nach der Zerkleinerung ist und je gründlicher eine Sichtung des zerkleinerten Gutes auf möglicherweise nicht vollständig separierte Leiterplatten erfolgt, desto geringer sind die Verluste bei der Sortierung.

Bei grober Gehäuseöffnung mit anschließender manueller Sortierung wird angenommen, dass die Ausbeute, je nach Feinteiligkeit der Sortierung und der Nachseparation nicht vollständig vom Gehäuse abgetrennter Leiterplattenbruchstücke, auf bis zu 90% gesteigert werden kann. Die spezifischen Kosten steigen dabei mit der Ausbeute stark exponentiell. Die treibhauswirksamen Emissionen bleiben konstant, da sich der Betrieb der Prallmühle und des Sortierbandes nicht ändert und die Umweltbelastungen durch die Bereitstellung der menschlichen Arbeitskraft nicht berücksichtigt werden. Wird anstelle der manuellen Sortierung eine automatische Sortierstrecke eingesetzt, so wird von vergleichbaren maximalen Ausbeuten ausgegangen. Steigerungen der Ausbeuten sind dabei mit geringeren Durchsätzen der Sortieranlage verbunden. Dadurch steigen die spezifischen Kosten exponentiell und die treibhauswirksamen Emissionen durch Betrieb der Sortierstrecke schwach exponentiell.

Eine weitere Steigerung der Ausbeute auf mehr als 90% ist nur durch zusätzliche Prozessschritte möglich. So können etwa Verbesserungen durch Nachzerkleinerung der nach Aussortierung erhaltenen Materialfraktion geringer bis mittlerer Partikelgröße sowie automatische Sortierung dieser Fraktion

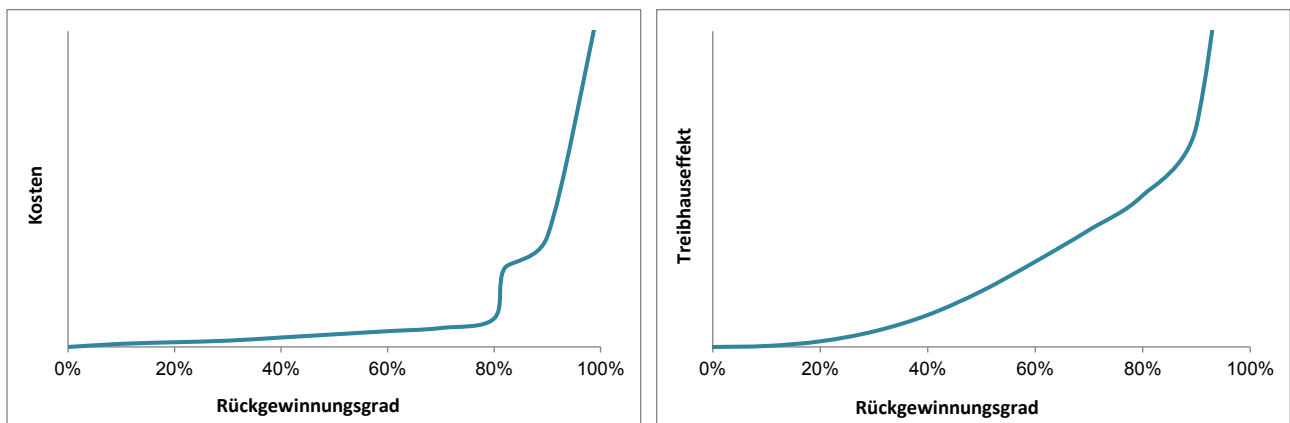
mit sehr geringem Durchsatz erzielt werden. Ausbeuten von über 95% sind allenfalls mit aufwendiger Nachbehandlung von Materialfraktionen einschließlich der Staubfraktion zu erreichen. Da all diese Prozessschritte zusätzlich zum zuvor beschriebenen Prozess realisiert werden müssen und ihrerseits eine Optimierungskurve aufweisen, wird für Steigerungen auf mehr als 90 % Ausbeute ein Sprung der Kostenkurve mit anschließender Fortsetzung des stark exponentiellen Anstiegs angenommen. Für die treibhauswirksamen Emissionen wird eine Fortsetzung des schwach exponentiellen Anstiegs angenommen.

Hinweis: je kleinteiliger die der Zerkleinerung zugeführten Elektronikkomponenten und damit auch Leiterplatten sind (s. Abschnitt Demontage), desto geringer ist die Ausbeute bei der Sortierung. Dieser Effekt wird hier vernachlässigt.

Die mit dem Transport zum nächsten Aufbereitungsschritt verbundenen Kosten und Umweltbelastungen werden als vernachlässigbar betrachtet.

Zusammengefasst wird für den Prozessschritt Aufbereitung eine stark exponentiell steigende spezifische Belastungskurve für die Aufbereitungskosten mit einem Sprung bei Einsatz ergänzender Technologien bei Ausbeuten von 90% angenommen, wogegen die spezifische Belastungskurve für die treibhauswirksamen Emissionen schwach exponentiell ansteigt (vgl. Abbildung 29).

Abbildung 29: Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Aufbereitung



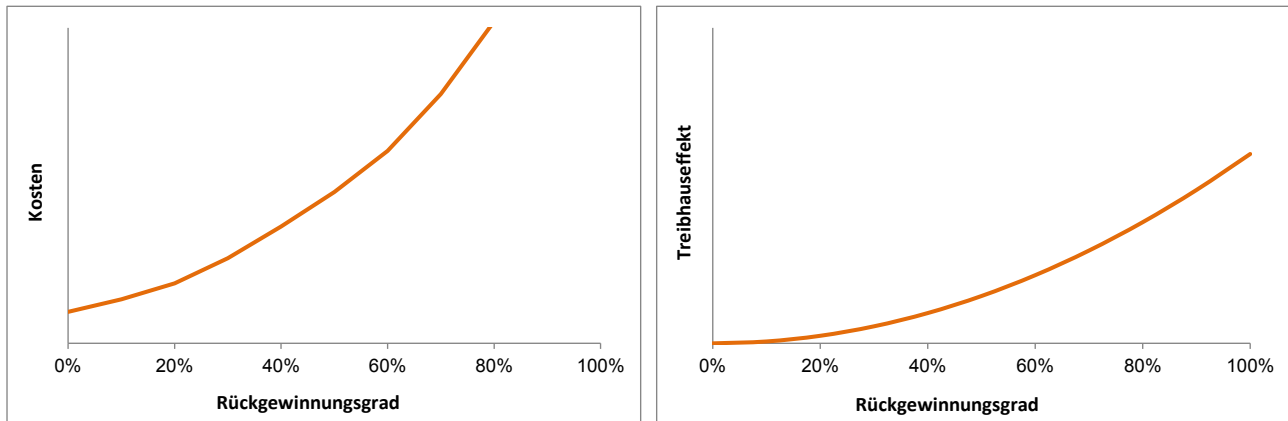
— Aufwand Aufbereitung

Verwertung

Die separierten Leiterplatten werden zur Rückgewinnung der Zielmetalle und weiterer Metalle, insbesondere des Kupfers, der Kupferhütte zugeführt. Die dort betriebenen Verwertungsprozesse sind heute technischer Standard und gut durchoptimiert. Metallrecyclingraten von > 95 % für die Zielmaterialien Gold, Silber, Platin und Palladium sind Stand der Technik und kaum mehr zu steigern. Derzeitige Aktivitäten zur kleinteiligen Optimierung der Gesamtprozesse in der Kupferhütte mögen noch Ausbeutensteigerungen von 1% bis 2 % ermöglichen. Eine Reduzierung der Ausbeute erscheint ebenfalls unrealistisch, da maximale Ausbeuten für diese Verfahren die zentrale wirtschaftliche Zielgröße sind, die zudem vom Kernprozess, der Verhüttung von Primärrohstoffen bestimmt werden.

Für die Verwertung der Zielmetalle in der Kupferhütte wird daher für Verwertungskosten wie auch treibhauswirksame Emissionen von einem näherungsweise linearen Zusammenhang ausgegangen. Mit der Menge des zugeführten Leiterplattenmaterials ändert sich nicht dessen Zusammensetzung, aber der Prozess der Kupferhütte wird davon beeinflusst (vgl. Abbildung 30).

Abbildung 30: Qualitative Darstellung der Kosten sowie der treibhausrelevanten Emissionen im Prozessschritt Verwertung



— Aufwand Verwertung

Um aus den dargestellten Zusammenhängen Kurven zur Abschätzung eines optimalen Rückgewinnungsgrades ableiten zu können, müssen diese zunächst mit Zahlenwerten hinterlegt werden. Im vergleichsweise einfachen Beispiel Leiterplatten aus Fahrzeugelektronik ist dies mit entsprechendem Aufwand und geeigneten Annahmen für einen gegebenen Punkt in jeder Kurve grundsätzlich möglich. Die Vorgehensweise entspräche dem gängigen Vorgehen bei der Ökobilanzierung.

Um hingegen die Funktion zu einer der Kurven annähern zu können, ist die Setzung von Annahmen zu weiteren Punkten in der Kurve und zu dem Zusammenwirken der genannten Einflussgrößen erforderlich, die wiederum auf die Annahmen des ersten Punktes aufbauen. Schließlich ist für das Zusammenführen der Einzelkurven zu einer Gesamtaussage deren Gewichtung erforderlich. Diese stellt sich aber wiederum für jede Punktombination aus den Einzelkurven anders dar. Die Gewichtung wäre somit wiederum eine komplexe Funktion, die das Zusammenwirken der Einzelfunktionen beschreibt.

Noch schwieriger wird die Lösungssuche im Falle von Verwertungsprozessen, die derzeit technisch noch nicht hinreichend definiert sind.

Die Erarbeitung mathematischer Funktionen in der beschriebenen Form ist prinzipiell machbar. Durch die Vielzahl an Annahmen und Abschätzungen, die hier zusammengeführt werden müssen, ist jedoch äußerst fraglich, ob das Ergebnis im Sinne des Projektzieles hilfreich sein kann. Dagegen sprechen vor allem folgende Aspekte:

- Durch aufeinander aufbauende und sich aufeinander beziehende Annahmen und Abschätzungen kommt es zur Multiplikation von Fehlern. Das Risiko ist groß, dass die Ergebnisse am Ende wenig belastbar und möglicherweise auch nicht plausibel sind. In jedem Falle wären sie angreifbar.
- Das Annahmengerüst und die rechnerischen Zusammenhänge sind auch für Experten nur mit großem Aufwand zu durchschauen. Dem Werkzeug mangelt es somit an Transparenz.
- Technische und organisatorische Prozesse können in der angenommenen Form realisiert werden, es sind aber auch andere Lösungswege denkbar. Das Modell wäre an den angenommenen Lösungsweg gebunden. Streng genommen handelt es sich daher nicht um ein Werkzeug zur Ermittlung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades sondern um ein solches, das nur für den angenommenen Lösungsweg nutzbar ist.

- Die Komplexität des Instrumentes würde vom Nutzer entweder nur als Black-Box genutzt werden können oder aber bei jeder Änderung die Überprüfung und Anpassung zahlreicher Parameter verlangen. Dem Werkzeug mangelt es also an Praxistauglichkeit.

Aus diesem Grunde wurde stattdessen das im folgenden Abschnitt skizzierte Vorgehen gewählt, also das qualitative oder halbquantitative Identifizieren und Analysieren von Stellschrauben für die Steigerung des Rückgewinnungsgrades hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität und Effizienz.

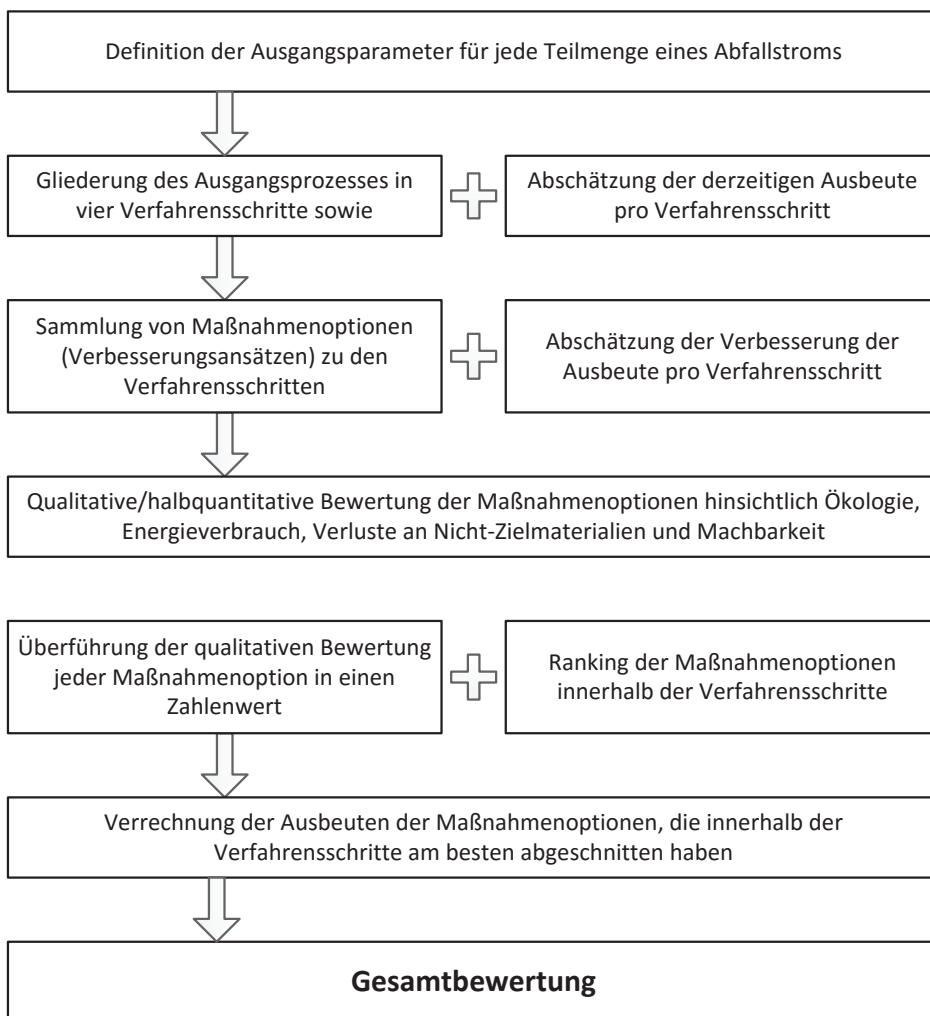
4.2 Wege zum optimalen Rückgewinnungsgrad – die Bewertungsmethode

Aufgrund der beschriebenen mangelnden Realisierbarkeit der Ermittlung eines ökologisch optimalen Rückgewinnungsgrades wird mit der folgenden Methodik ein Werkzeug bereitgestellt, das eine Abschätzung und Einordnung des realistisch Machbaren ermöglicht. Hierzu erfolgt eine qualitative bis halbquantitative Identifikation und Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung des Rückgewinnungsgrades hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität und Effizienz in einem Tabellenkalkulations-Tool. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

- Zunächst erfolgt eine Definition der Ausgangsparameter für jede Teilmenge des betrachteten Abfallstroms. Dazu gehören Bezeichnung, Aufkommen (Menge) und Konzentration der Zielmetalle.
- Dann erfolgt die Gliederung des Ausgangsprozesses in die vier Verfahrensschritte Erfassung, Vorbehandlung, Aufbereitung und Verwertung/Rückgewinnung sowie eine Abschätzung der derzeitigen Ausbeute in den Verfahrensschritten (Prozessstufen). Jeder Schritt wird mit Blick auf das Potenzial zur Steigerung des Rückgewinnungsgrades bewertet. Verfahrensschritte ohne größeres Potenzial werden in der anschließenden Analyse nicht weiter betrachtet.
- Anschließend erfolgt eine Sammlung von Maßnahmenoptionen (Verbesserungsansätze) zu den Verfahrensschritten. Hierzu wurde ein allgemeiner Maßnahmenkatalog erarbeitet, der für die verschiedenen Abfallströme spezifiziert und ergänzt werden kann. Für jede Maßnahmenoption wird die Verbesserung der Ausbeute des Verfahrensschritts ausgehend von der Ausgangssituation abgeschätzt.
- Die Bewertung der Maßnahmenoptionen wird qualitativ oder halbquantitativ anhand von sechs Kriterien hinsichtlich Ökologie (Global Warming Potential, Toxikologie), Energieverbrauch (Kumulierter Energieaufwand), Einfluss auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien und Machbarkeit (Realisierungschancen, Realisierungsaufwand) vorgenommen.
- Über eine prozentuale Gewichtung der Kriterien sowie über deren Attributsausprägungen wird die qualitative Bewertung jeder Maßnahmenoption in einen Zahlenwert überführt. Diese Werte dienen als Grundlage für ein Ranking der Maßnahmenoptionen innerhalb der Verfahrensschritte, um die voraussichtlich beste Maßnahmenoption pro Verfahrensschritt zu ermitteln.
- Zur Annäherung des optimalen Rückgewinnungsgrads für den Gesamtprozess werden die Ausbeuten der Maßnahmenoptionen, die innerhalb der Verfahrensschritte am besten abgeschnitten haben, miteinander verrechnet.
- Abschließend wird eine Gesamtbewertung der ausgewählten Maßnahmenoptionen vorgenommen, indem der erreichte Rückgewinnungsgrad, das Global Warming Potential, der kumulierte Energieaufwand und der Neuwert der substituierten Zielmaterialien zu den Werten der Ausgangssituation ins Verhältnis gesetzt werden.

Abbildung 31 fasst die Vorgehensweise der Bewertungsmethode noch einmal graphisch zusammen.

Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bewertungsmethode



Über die im Werkzeug verwendeten Kriterien hinaus können für die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Ausbeute von Edel- und Sondermetallen weitere Kriterien von Bedeutung sein, wie beispielsweise:

Chemische Bindungsform: Die chemische Bindungsform, in der die zurückzugewinnenden Metalle vorliegen, ist wichtig für den ökologischen und ökonomischen Aufbereitungsaufwand. Implizit geht auch dieser Aspekt in die Bewertung durch das Werkzeug ein, da etwa Aufbereitungsprozesse für oxidisch vorliegende Metalle in der Regel aufwendiger sind als solche für elementar vorliegende. Dadurch werden zum einen weitere Verfahrensschritte erforderlich, die mit zusätzlichen Ausbeuteverlusten verbunden sind. Zum anderen sind die dann komplexeren Prozesse auch anders zu bewerten, da sie größere Umweltbelastungen und Kosten verursachen.

Bergbau-Haupt- und -Nebenprodukte: Ob und in welchem Umfang Maßnahmen zur Steigerung der Rückgewinnung von Metallen ökologisch zweckmäßig sind, hängt auch von der Marktsituation solcher Metalle ab. So fallen die Seltenerdmetalle Cer und Lanthan in relativ großer Menge bei der Primärgewinnung anderer Seltenerdmetalle an. Mit Verfügbarkeitsengpässen ist daher kaum zu rechnen. Aus dem Recycling gewonnenes Cer oder Lanthan dürften also kaum Material verdrängen, das aus dem Bergbau stammt. Auch dieser Faktor ist aber implizit über das Werkzeug abgebildet weil er sich in den vergleichsweise niedrigen Marktpreisen von Cer und Lanthan widerspiegelt, die deutlich unter denen anderer Seltenerdmetalle liegen. Im Übrigen sind auch die Treibhausgasemissionen der Gewinnung von Lanthan und insbesondere Cer vergleichsweise niedrig.

Dieses Werkzeug bietet einen pragmatischen Ansatz zur transparenten Annäherung an einen realistisch machbaren Rückgewinnungsgrad. Es erlaubt eine Abschätzung der Effektivität der betrachteten Maßnahmen sowie deren qualitative Bewertung.

Die – auch in den nachfolgend dargestellten Anwendungsbeispielen - aufgeführten Bewertungen und Ausbeutesteigerungen sind in der Regel Annahmen, die auf bifa-Expertenschätzungen beruhen. Es handelt sich nicht um wissenschaftlich belegte Zahlen sondern um Annäherungen an die zu erwartende Realität. Je nach Ausgestaltung der Maßnahme können davon abweichende Werte realistischer sein. So kann die Ausbeute bei der Zerkleinerung von Bauteilen und der manuellen Aussortierung von Leiterplattenbruchstücken mit höherem Aufwand auch zu besseren und mit geringerem Aufwand zu schlechteren Ergebnissen geführt werden. Die angesetzten Werte sind Ergebnis einer möglichst realitätsnahen Abschätzung.

Ein wesentlicher Nutzen des Werkzeugs ist die Möglichkeit, ohne großen Aufwand mit möglichen Maßnahmen und ihren Bewertungen zu spielen um deren Auswirkungen besser einschätzen zu können. Es erhebt nicht den Anspruch, detaillierte Analysen, Praxisversuche und Ökobilanzen zu ersetzen. Diese bleiben zur Erzielung belastbarer quantitativer Bewertungen unverzichtbar. Es bietet aber eine auch bei schlechter Datenbasis die Möglichkeit zur Eingrenzung derzeit gegebener wie auch realistisch zu erwartender Rückgewinnungsgrade und zur Bewertung der Effektivität möglicher Maßnahmenoptionen. Das Werkzeug arbeitet mit einfach handhabbaren Bewertungskriterien. Seine Handhabung ist schnell erlernbar.

4.2.1 Typologie Maßnahmenoptionen

Maßnahmenoptionen zur Verbesserung des Rückgewinnungsgrades einer Ausgangssituation umfassen zum einen direkte Maßnahmen, die unmittelbar zur Verbesserung eines Prozesses beitragen, sowie zum anderen übergeordnete rechtliche, organisatorische und technische Steuerungsmaßnahmen⁴³.

Allgemeiner Katalog direkter Maßnahmenoptionen: Varianten und Beispiele

Für die Einstufung potenzieller Maßnahmenoptionen wurde ein allgemeiner Maßnahmenkatalog erarbeitet, der bei der Charakterisierung der Maßnahmenoptionen hinsichtlich Ökologie, Energiebedarf, Kosten und Machbarkeit mit einer Erstbewertung (Default-Bewertung) unterstützen soll. Der Maßnahmenkatalog umfasst sieben Kategorien mit insgesamt 20 Varianten, die zur Verbesserung eines Prozesses beitragen können und nennenswerte Umwelt-, Energie- oder Kosteneffekt haben. Die Kategorien und ihre Varianten werden – zusammen mit Beispielen zur Veranschaulichung – in Tabelle 99 bis Tabelle 105 zusammengefasst.

Für die Bewertung potenzieller Maßnahmenoptionen wurde ein Maßnahmenkatalog erarbeitet, der eine Erstbewertung (Default-Bewertung) der Maßnahmenoptionen hinsichtlich Ökologie, Energiebedarf, Kosten und Machbarkeit vornimmt.

⁴³ Die möglichen Nebeneffekte übergeordneter Steuerungsmaßnahmen auf Faktoren, wie Qualität der erfassten Abfälle, Kosten oder Mitwirkungsbereitschaft der Akteure mit ihren ökologischen Folgewirkungen können hier nicht im Detail analysiert werden.

Tabelle 99: Allgemeiner Maßnahmenkatalog I: Organisatorische Maßnahmen

Kategorie	Variante	Beispiele
Organisatorische Maßnahmen	Optimierung bestehender Erfassungsstrukturen	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung Öffnungszeiten • Werbung • Bessere interne Stoffführung • Kontrollen • Arbeitsmittel • Mitarbeiterschulungen • Informationen am Arbeitsplatz
	Einführung neuer Erfassungssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Abfallspezifische Sammlungen (aber kleinere Mengen) • Mehr Sammelstellen • Kostenlose Holsysteme • Neue Transport- und Behältersysteme

Tabelle 100: Allgemeiner Maßnahmenkatalog II: Manuelle Prozesse (u.a. Demontage, Sortierung)

Kategorie	Variante	Beispiele
Manuelle Prozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender manueller Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiterstärkung (Schulungen, Visualisierung von Aufgaben etc.) • Steigerung der Demontagetiefe • Reduzierung von Fehlsortierungen • Zusätzliche Aufgaben im Rahmen bestehender Demontageprozesse • Aussortierung einer weiteren Sortierfraktion bei bestehender Sortierung
	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Demontageprozesse • Einfache Sortieraufgaben
	Neue/zusätzliche aufwendigere manuelle Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Demontieren schwer zugänglicher Bauteile • Komplexe Demontageaufgaben • Einrichtung manueller Sortierstrecken

Tabelle 101: Allgemeiner Maßnahmenkatalog III: Mechanische Prozesse (u.a. Zerkleinerung, Auftrennung, Klassierung, Sortierung)

Kategorie	Variante	Beispiele
Mechanische Prozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender mechanischer Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der Produktfeinheit (Fraktionen, Korngröße) • Prozesskontrolle, optimale Prozessparameter • Zusätzliche Aufgaben im Rahmen bestehender Zerkleinerungs-, Auftrennungs- und Sortierprozesse • Verkürzung bestehender Prozessketten
	Neue/zusätzliche einfache mechanische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Prozesse zur Zerkleinerung, Auftrennung, Klassierung und Sortierung • Kornklassegröße besser auf die weitere Ver-

Kategorie	Variante	Beispiele
		arbeitung der Produkte anpassen
	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische Zerkleinerungs-/Auftrennungspfade abhängig vom gewünschten Zielmaterial • Zerkleinerung/Auftrennung schwer zerstörbarer Bauteile • Komplexe Zerkleinerungs-/Auftrennungsaufgaben (Kombination verschiedener Aggregatstypen), z.B. bei schärferen Trenngrenzen • Neue Verschaltungen und Regelstrategien für mechanische Zerkleinerungs-, und Auftrennungsstrecken • Sensorgestützte Sortierstrecken

Tabelle 102: Allgemeiner Maßnahmenkatalog IV: Hydrometallurgische Prozesse (u.a. Laugung, Fällung, Solventextraktion, Ionenaustausch, Aufkonzentrierung)

Kategorie	Variante	Beispiele
Hydrometallurgische Prozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender hydrometallurgischer Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung der Prozesse (Wahl optimaler Temperaturen, Erzeugung optimaler Reaktionsmedien) • Verkürzung bestehender Prozessketten bzw. Prozesskopplung
	Neue/zusätzliche einfache hydrometallurgische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Rührprozesse • Einfache Extraktionsanlagen • Einfache Flotationsprozesse • Einfache Elektrolysebäder • Einfache Abscheidung der Zielmetalle (z.B. als Metallverbindungen durch Fällung)
	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe technische Anlagen mit einer Kombination verschiedener Prozesse/Verfahren (auch unterschiedlicher physikalischer Basis) • Neue Ansätze, z.B. Einsatz von ionischen Flüssigkeiten • Komplexe Abscheidung der Zielmetalle (z.B. mehrstufige Extraktion oder Elektrolyse)

Tabelle 103: Allgemeiner Maßnahmenkatalog V: Pyrometallurgische Prozesse (u.a. Stein- und Reduktionsschmelzen, Feuerraffination, Seigerung)

Kategorie	Variante	Beispiele
Pyrometallurgische Prozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender pyrometallurgischer Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung des Schmelzofenbetriebs (Optimierung der Verbrennung, Verbesserung der Prozessstabilität) • Verkürzung bestehender Prozessketten
	Neue/zusätzliche einfache py-	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Schmelzöfen

Kategorie	Variante	Beispiele
	rometallurgische Prozesse	
	Neue/zusätzliche aufwendigere pyrometallurgische Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrstufige Schmelzverfahren zur Gewinnung von Metallen aus komplex zusammengesetzten Mischungen

Tabelle 104: Allgemeiner Maßnahmenkatalog VI: Hochtemperaturprozesse⁴⁴ (Prozesse mit Temperaturen > 600 °C)

Kategorie	Variante	Beispiele
Hochtemperaturprozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender Hochtemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Temperatursteuerung • Bessere Durchmischung • Sauerstoffanreicherung erhöhen • Prozesskoppelung
	Neue/zusätzliche einfache Hochtemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Öfen • Andere einfache thermische Prozesse
	Neue/zusätzliche aufwendigere Hochtemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwendige Öfen • Neue auf In- oder Output spezialisierte Prozesse • Hochtemperaturdestillation

Tabelle 105: Allgemeiner Maßnahmenkatalog VII: Niedertemperaturprozesse (Prozesse mit Temperaturen < 400 °C)

Kategorie	Variante	Beispiele
Niedertemperaturprozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender Niedertemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Prozessführung
	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Anlagen zur Niedertemperaturbehandlung
	Neue/zusätzliche aufwendigere Niedertemperaturprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Spezielle Niedertemperaturverfahren zur Vermeidung unerwünschter Degradationsprodukten • Aufwendigere Niedertemperaturverfahren

Übergeordnete Steuerungsmaßnahmen: Beispiele

Zu einer Verbesserung führende übergeordnete Steuerungsmaßnahmen haben selbst entweder keine nennenswerten direkten ökologischen Auswirkungen oder sie sind in ihren möglichen Effekten hier nicht beurteilbar. Sie können aber ebenso wie die bisher aufgeführten allgemeinen direkten Maßnahmen mit dem Tool hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden.

In Tabelle 106 sind Beispiele für übergeordnete Steuerungsmaßnahmen zusammengefasst.

⁴⁴ Ohne pyrometallurgische Prozesse

Tabelle 106: Allgemeiner Maßnahmenkatalog VIII: Übergeordnete Steuerungsmaßnahmen

Verfahrensschritt	Beispiele
Erfassung (Sammlung)	<ul style="list-style-type: none"> • Unterbindung (illegaler) Exporte / Entsorgung¹⁾ • Ökonomische Anreize²⁾ • Gesetzliche Verpflichtungen, z.B. Abgabepflicht an bestimmte Systeme • Freiwillige Selbstverpflichtung
Vorseparation (z.B. Demontage)	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiterstärkung³⁾ • Organisatorische Verbesserungen⁴⁾ • Ökonomische Anreize⁵⁾ • Gesetzliche Verpflichtungen⁶⁾ • Freiwillige Selbstverpflichtung
Aufbereitung zur Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiterstärkung³⁾ • Organisatorische Verbesserungen⁴⁾ • Ökonomische Anreize⁵⁾ • Gesetzliche Verpflichtungen⁶⁾ • Freiwillige Selbstverpflichtung
Verwertung zu marktfähigem Produkt	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiterstärkung³⁾ • Organisatorische Verbesserungen⁴⁾ • Ökonomische Anreize⁵⁾ • Gesetzliche Verpflichtungen⁶⁾ • Freiwillige Selbstverpflichtung

¹⁾ z.B. durch Stärkung des Vollzugs

²⁾ z.B. Pfand, Vergütung, Verpflichtung, Erfassungsquote

³⁾ z.B. Schulung

⁴⁾ bessere Stoffstromführung, Kontrolle, Arbeitsmittel, Information am Arbeitsplatz

⁵⁾ z.B. Vergütung

⁶⁾ z.B. Recyclingquote

4.2.2 Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen: Kriterien und Attributsausprägungen

Die Bewertung der Maßnahmenoptionen wird qualitativ oder halbquantitativ anhand folgender Kriterien vorgenommen:

- Global Warming Potential (GWP): Höhe der Belastung der Umwelt mit Treibhausgasen
- Kumulierter Energieaufwand (KEA): Höhe des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern
- Toxikologie: Höhe der human- und/oder ökotoxischen Belastung von Böden und Gewässern
- Einfluss auf die Ausbeute an werthaltigen Nicht-Zielmaterialien: Vergleich zur Ausgangssituation
- Realisierungschancen: technischer Entwicklungsstand der Maßnahme bzw. Erfolgsaussichten der Umsetzung
- Realisierungsaufwand: Kosten der Umsetzung

Tabelle 107 zeigt die qualitativen Attributsausprägungen, welche die Kriterien (in dieser Bewertung) annehmen können.

Tabelle 107: Attributsausprägungen der verwendeten Kriterien

Kriterium	Ausprägung				
GWP	(1) sehr große Belastungen	(2) große Belastungen	(3) moderate Belastungen	(4) geringe Belastungen	(5) sehr geringe/keine Belastungen
KEA	(1) sehr großer Verbrauch	(2) großer Verbrauch	(3) moderater Verbrauch	(4) geringer Verbrauch	(5) sehr geringer/kein Verbrauch
Toxikologie	(1) sehr große Belastungen	(2) große Belastungen	(3) moderate Belastungen	(4) geringe Belastungen	(5) sehr geringe/keine Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	(1) viel schlechter ¹	(2) schlechter ¹	(3) unverändert ¹	(4) besser ¹	(5) viel besser ¹
Realisierungschancen	(1) sehr schlechte Chancen	(2) schlechte Chancen	(3) moderate Chancen	(4) gute Chancen	(5) sehr gute Chancen
Realisierungsaufwand	(1) sehr hohe Kosten	(2) hohe Kosten	(3) moderate Kosten	(4) geringe Kosten	(5) sehr geringe Kosten

¹ gegenüber Ausgangssituation

Nachfolgend werden Vorschläge für eine grundlegende Basis-Bewertung der Varianten im allgemeinen Maßnahmenkatalog vorgestellt (Default-Werte). Diese Werte sollen mögliche Bewertungen anbieten, von denen im Einzelfall gegebenenfalls abgewichen werden muss.

Organisatorische Maßnahmen

GWP und KEA sowie die Kosten für die Realisierung von Maßnahmen werden im Wesentlichen durch die Anzahl der Transporte sowie die Transportentfernungen bestimmt, sofern sich hier Änderungen ergeben. Die Herstellung und der Unterhalt der Fahrzeuge werden dabei als Umweltbelastung selbst nicht berücksichtigt.

Es wird davon ausgegangen, dass sich die Verluste an Nicht-Zielmaterialien durch Umsetzung organisatorischer Maßnahmen verringern während keine toxikologisch relevanten Emissionen zu erwarten sind. Die Realisierungschancen für die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen müssen aufgrund der Spannweite an Maßnahmen spezifisch abgeschätzt werden. Für die Einführung neuer Sammelsysteme werden die Realisierungschancen als eher schlecht eingeschätzt.

In Tabelle 108 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung der organisatorischen Maßnahmen dargestellt.

Tabelle 108: Default-Werte für die Bewertung organisatorischer Maßnahmen

Kriterium	Optimierung bestehender Entsorgungsstrukturen	Einführung neuer Erfassungssysteme
GWP	(4) geringe Belastungen	(3) moderate/mittlere Belastungen
KEA	(4) geringer Verbrauch	(3) moderater/mittlerer Verbrauch
Toxikologie	(5) sehr geringe/keine Belastungen	(5) sehr geringe/keine Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	(4) besser gegenüber Ausgangssituation	(4) besser gegenüber Ausgangssituation
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	(2) schlechte Chancen
Realisierungsaufwand	(3) moderate/mittlere Kosten	(2) hohe Kosten

Manuelle Prozesse

GWP und KEA werden bei manuellen Prozessen im Wesentlichen durch die Gebäudeheizung bestimmt. Gegebenenfalls ist auch ein (geringer) Stromverbrauch für eingesetzte Werkzeuge zu berücksichtigen. Als Umweltbelastung nicht berücksichtigt wird dagegen die Bereitstellung der menschlichen Arbeit.

Es wird davon ausgegangen, dass für den Realisierungsaufwand eine breite Spannweite zwischen geringen Kosten für Optimierungs-/Intensivierungsmaßnahmen und hohen Kosten für neue oder zusätzliche aufwendigere manuelle Prozesse gegeben ist. Toxikologisch relevante Emissionen sind nicht zu erwarten. Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien sowie die Realisierungschancen müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden.

In Tabelle 109 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung manueller Prozesse dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. der Einsatz sehr energieintensiver Werkzeuge, Arbeiten bei hohen Temperaturen oder freigesetzte kritische Chemikalien sein.

Tabelle 109: Default-Werte für die Bewertung manueller Prozesse

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender manueller Prozesse	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere manuelle Prozesse
GWP	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen
KEA	(5) sehr geringer/ kein Verbrauch	(5) sehr geringer/ kein Verbrauch	(5) sehr geringer/ kein Verbrauch
Toxikologie	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungsaufwand	(4) geringe Kosten	(3) moderate/mittlere Kosten	(2) hohe Kosten

Mechanische Prozesse

GWP und KEA werden bei mechanischen Prozessen im Wesentlichen aus dem Energieverbrauch für die eingesetzten Maschinen und Anlagen bestimmt. Nicht berücksichtigt als Umweltbelastung werden die Herstellung und der Unterhalt der Maschinen und Anlagen selbst.

Es wird davon ausgegangen, dass der Realisierungsaufwand zwischen sehr geringen Kosten für Optimierungs-/Intensivierungsmaßnahmen und hohen Kosten für neue oder zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse liegt. Toxikologisch relevante Emissionen sind nicht zu erwarten. Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden, wie auch der Realisierungsaufwand. Lediglich für neue oder zusätzliche aufwendigere maschinelle Prozesse muss mit mindestens hohen Kosten gerechnet werden.

In Tabelle 110 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung mechanischer Prozesse dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. sehr feines Vermahlen mineralischer oder metallischer Materialien, Arbeiten bei hohen oder tiefen Temperaturen oder ein hoher Verbrauch an Hilfsstoffen, Wasser, Schutzgasen etc. sein.

Tabelle 110: Default-Werte für die Bewertung mechanischer Prozesse

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender mechanischer Prozesse	Neue/zusätzliche einfache mechanische Prozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse
GWP	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen	(5) moderate/mittlere Belastungen
KEA	(4) geringer Verbrauch	(5) geringer Verbrauch	(5) moderater/mittlerer Verbrauch
Toxikologie	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(5) sehr geringe/ keine Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	(2) schlechte Chancen
Realisierungsaufwand	(5) sehr geringe Kosten	(3) geringe Kosten	(2) hohe Kosten

Hydrometallurgische Prozesse

GWP und KEA werden bei hydrometallurgischen Prozessen im Wesentlichen durch den Energieverbrauch bestimmt. Auch die Kosten für die Realisierung einer Maßnahme beeinflusst der Energieverbrauch, allerdings spielt hier auch die Einsatzmenge an Hilfsstoffe eine maßgebliche Rolle. Diese Einsatzmengen sind ebenfalls für auftretende toxisch relevante Emissionen verantwortlich. Nicht berücksichtigt als Umweltbelastung werden die Herstellung und der Unterhalt der Anlagen bzw. Anlagentechnik selbst.

Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien sowie die Realisierungschancen müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden.

In Tabelle 111 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung hydrometallurgischer Prozesse dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. ein erhöhter Bedarf an thermischer Energie, ein hoher Verbrauch an Hilfsstoffen, Wasser, Schutzgasen etc. oder die aufwendige Reinigung von Abluft/Abwässern bzw. die aufwendige Entsorgung von Reststoffen sein.

Tabelle 111: Default-Werte für die Bewertung hydrometallurgischer Prozesse

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender hydrometallurgischer Prozesse	Neue/zusätzliche einfache hydrometallurgische Prozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse
GWP	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(4) geringe Belastungen	(2) große Belastungen
KEA	(5) sehr geringer/ kein Verbrauch	(4) geringer Verbrauch	(2) großer Verbrauch
Toxikologie	(5) sehr geringe/ keine Belastungen	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender hydrometallurgischer Prozesse	Neue/zusätzliche einfache hydrometallurgische Prozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungsaufwand	(3) moderate/mittlere Kosten	(3) moderate/mittlere Kosten	(2) hohe Kosten

Pyrometallurgische Prozesse

GWP und KEA und auch die Kosten für die Realisierung von Maßnahmen werden bei pyrometallurgischen Prozessen im Wesentlichen durch den Bedarf an Energieträgern für thermische Energie bestimmt. Als Umweltbelastung nicht berücksichtigt werden die Herstellung und der Unterhalt der Anlagen bzw. Anlagentechnik selbst.

Toxikologisch relevante Emissionen sind lediglich in geringem Umfang zu erwarten und Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien sowie die Realisierungschancen müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden.

In Tabelle 112 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung hydrometallurgischer Prozesse dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. ein deutlich niedrigerer Bedarf an thermischer Energie oder eine einfache (bis hin zu keiner) Reinigung von Abluft/Abwässern bzw. eine einfache Entsorgung von Reststoffen sein.

Tabelle 112: Default-Werte für die Bewertung pyrometallurgischer Prozesse

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender pyrometallurgischer Prozesse	Neue/zusätzliche einfache pyrometallurgische Prozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere pyrometallurgische Prozesse
GWP	(4) geringe Belastungen	(3) moderate/mittlere Belastungen	(1) sehr große Belastungen
KEA	(4) geringer Verbrauch	(3) moderater/mittlerer Verbrauch	(1) sehr großer Verbrauch
Toxikologie	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungsaufwand	(3) moderate/mittlere Kosten	(3) moderate/mittlere Kosten	(1) sehr hohe Kosten

Hochtemperaturprozesse (Temperaturen > 600 °C)

GWP und KEA und auch die Kosten für die Realisierung von Maßnahmen werden bei Hochtemperaturprozessen im Wesentlichen durch den Bedarf an Energieträgern für thermische Energie bestimmt. Als Umweltbelastung nicht berücksichtigt werden die Herstellung und der Unterhalt der Anlagen bzw. Anlagentechnik selbst.

Toxikologisch relevante Emissionen sind lediglich in geringem Umfang zu erwarten. Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden, wie

auch der Realisierungsaufwand. Lediglich für neue oder zusätzliche aufwendigere Hochtemperaturprozesse muss mit sehr hohen Kosten gerechnet werden.

In Tabelle 113 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung von Hochtemperaturprozessen dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. spezifische Verfahren für definierte In- und Outputs sein.

Tabelle 113: Default-Werte für die Bewertung von Hochtemperaturprozessen

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender Hochtemperaturprozesse	Neue/zusätzliche einfache Hochtemperaturprozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere Hochtemperaturprozesse
GWP	(3) moderate/mittlere Belastungen	(3) moderate/mittlere Belastungen	(1) sehr große Belastungen
KEA	(3) moderater/mittlerer Verbrauch	(3) moderater/mittlerer Verbrauch	(1) sehr großer Verbrauch
Toxikologie	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	(2) schlechte Chancen
Realisierungsaufwand	(2) hohe Kosten	(2) hohe Kosten	(1) sehr hohe Kosten

Niedertemperaturprozesse (Temperaturen < 400 °C)

GWP und KEA werden auch bei Niedertemperaturprozessen im Wesentlichen durch den Bedarf an thermischer Energie bestimmt, auch wenn die Prozesse bei geringeren Temperaturen als Hochtemperaturprozesse arbeiten. Der größte Kostenaspekt ist die Anlagentechnik, die für die Realisierung einer Maßnahme notwendig ist.

Toxikologisch relevante Emissionen sind lediglich in geringem Umfang zu erwarten und Auswirkungen auf die Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien sowie die Realisierungschancen müssen für jede Maßnahme spezifisch abgeschätzt werden.

In Tabelle 114 sind die daraus abgeleiteten Vorschläge für die Basis-Bewertung von Niedertemperaturprozessen dargestellt. Gründe für eine davon abweichende Bewertung können u.a. spezifische Anlageneigenschaften und -parameter sein.

Tabelle 114: Default-Werte für die Bewertung von Niedertemperaturprozessen

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender Niedertemperaturprozesse	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere Niedertemperaturprozesse
GWP	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen
KEA	(4) geringer Verbrauch	(4) geringer Verbrauch	(4) geringer Verbrauch
Toxikologie	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen	(4) geringe Belastungen
Verlust an Nicht-Zielmaterialien	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen

Kriterium	Optimierung/ Intensivierung bestehender Niedertemperaturprozesse	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse	Neue/zusätzliche aufwendigere Niedertemperaturprozesse
Realisierungschancen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen	spezifisch abzuschätzen
Realisierungsaufwand	(3) moderate/mittlere Kosten	(3) moderate/mittlere Kosten	(2) hohe Kosten

4.2.3 Ausgangsdaten für die quantitative Bewertung der ermittelten Rückgewinnungsgrade

In einer Gesamtbewertung der ausgewählten Maßnahmenoptionen werden die vermiedenen treibhauswirksamen Emissionen, der vermiedene Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträger sowie die vermiedene Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen ermittelt. Grundlagen dafür sind

- das Global Warming Potential der substituierten Zielelemente im globalen Marktmix,
- der Kumulierte Energieaufwand für die substituierten Zielelemente im globalen Marktmix sowie
- Neuwarenwerte/Marktpreise der substituierten Zielelemente.

In Tabelle 115 und Tabelle 116 sind die dafür im Tabellenkalkulations-Tool verwendeten Basisdaten aufgelistet.

Tabelle 115: Verwendete Daten zu GWP und KEA der betrachteten Zielmaterialien

Material (Metall)	Datensatz	Quelle
Cer (Ce)	market for cerium concentrate, 60% cerium oxide	ecoinvent v3.4
Dysprosium (Dy)	Life Cycle Assessment of Dysprosium	PLoS One
Erbium (Er)	Life Cycle Assessment of Erbium	PLoS One
Europium (Eu)	market for samarium europium gadolinium concentrate, 94% rare earth oxide	ecoinvent v3.4
Gadolinium (Ga)	market for samarium europium gadolinium concentrate, 94% rare earth oxide	ecoinvent v3.4
Gallium (Ga)	market for gallium, semiconductor-grade	ecoinvent v3.4
Germanium (Ge)	Life Cycle Assessment of Germanium	PLoS One
Gold (Au)	market for gold	ecoinvent v3.4
Indium (In)	market for indium	ecoinvent v3.4
Lanthan (La)	market for lanthanum oxide	ecoinvent v3.4
Neodym (Nd)	market for neodymium oxide	ecoinvent v3.4
Palladium (Pd)	market for palladium	ecoinvent v3.4
Platin (Pt)	market for platinum	ecoinvent v3.4
Praseodym (Pr)	market for praseodymium oxide	ecoinvent v3.4
Samarium (Sa)	market for samarium europium gadolinium concentrate, 94% rare earth oxide	ecoinvent v3.4
Silber (Ag)	market for silver	ecoinvent v3.4

Material (Metall)	Datensatz	Quelle
Tantal (Ta)	market for tantalum, powder, capacitor-grade	ecoinvent v3.4
Terbium (Tb)	Life Cycle Assessment of Yttrium	PLoS One
Yttrium (Y)	Life Cycle Assessment of Yttrium	PLoS One

Quellen: PLoS 2014, ecoinvent 2017

Tabelle 116: Neuwarenwerte der betrachteten Zielmaterialien

Material (Metall)	Neuwarenwert [€/kg]	Quelle
Cer (Ce)	4,52	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Dysprosium (Dy)	331	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Erbium (Er)	80,40	Ökoinstitut: Study on Rare Earths and their Recycling (Einzelwert 2010)
Europium (Eu)	614	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Gadolinium (Ga)	85,65	Institut für seltene Erden und Metalle (Einzelwert 2016)
Gallium (Ga)	381	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Germanium (Ge)	1.380	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Gold (Au)	43.276	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Indium (In)	438	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Lanthan (La)	4,52	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Neodym (Nd)	51,04	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Palladium (Pd)	22.301	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Platin (Pt)	41.358	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Praseodym (Pr)	122	Institut für seltene Erden und Metalle (Einzelwert 2016)
Samarium (Sa)	44,04	Ökoinstitut: Study on Rare Earths and their Recycling (Einzelwert 2010)
Silber (Ag)	699	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Tantal (Ta)	200	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)
Terbium (Tb)	641	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)

Material (Metall)	Neuwarenwert [€/kg]	Quelle
Yttrium (Y)	63,96	U.S. Geological Survey: Rare earths (Mittelwert 2012 bis 2016)

Quellen: USGS (2017), Öko-Institut e.V. (2011), ISE (2016)

4.2.4 Vorstellung der Funktionsweise des Tabellenkalkulations-Tools am Beispiel eines Abfallstroms mit einer Teilmenge (edelmetallhaltige Leiterplatten aus Altfahrzeugen)

Nachfolgend wird die skizzierte Vorgehensweise zur Abschätzung des optimalen Rückgewinnungsgrades mit Hilfe des Tabellenkalkulations-Tools am Beispiel des edelmetallhaltigen Abfallstroms *Leiterplatten aus Altfahrzeugen* veranschaulicht.

Definition der Ausgangssituation für die verschiedenen Abfallströme

Die Gesamtanzahl an Altfahrzeugen, die in Deutschland jährlich anfällt, ist nicht bekannt und kann nur grob abgeschätzt werden. In diesem Beispiel wird von 1 Mio. Fahrzeuge/a ausgegangen.

Die darin enthaltene Gesamtmenge an Leiterplatten wird auf 1.000 t/a abgeschätzt mit einer steigenden Tendenz für zukünftige Mengen bei zugleich sinkendem Edelmetallgehalt. Die Zielmetallgehalte der Leiterplatten werden wie folgt angenommen:

- 0,016 Gew.-% Gold
- 0,061 Gew.-% Silber
- < 0,01 Gew.-% Palladium
- < 0,001 Gew.-% Platin

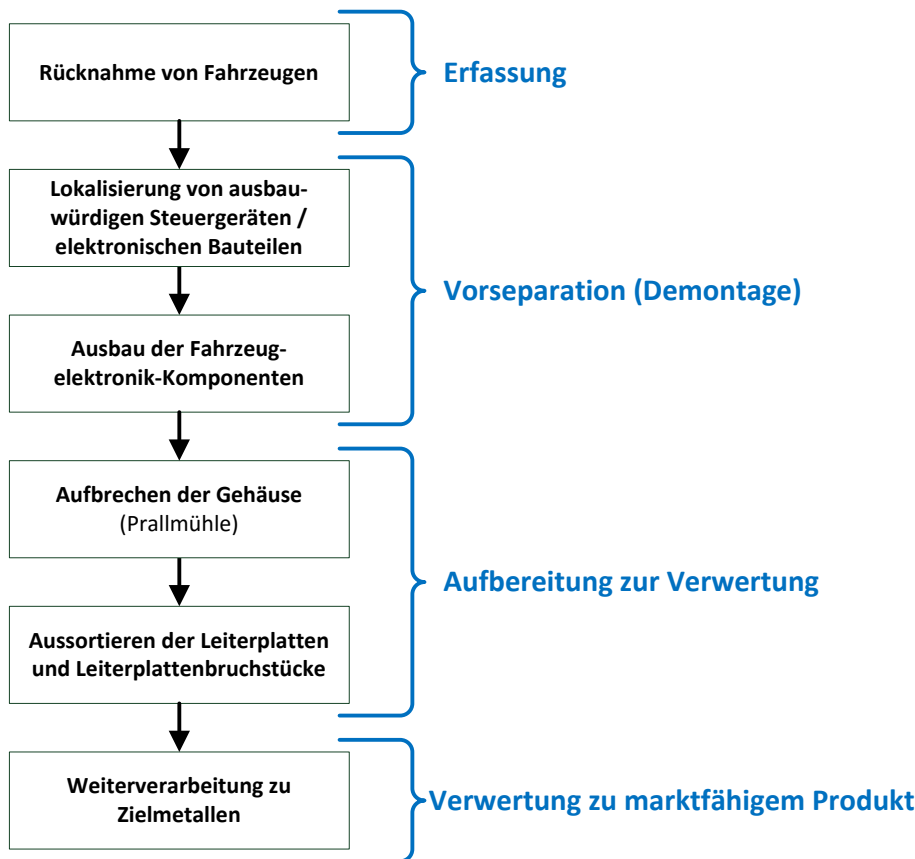
Basierend auf den Neuwarenpreisen der Zielmaterialien (vgl. Tabelle 116) wird das Wertpotenzial der Gesamtmenge Altfahrzeuge mit ca. 9,55 Mio. € abgeschätzt. Allerdings wird derzeit aufgrund der nahezu vollständig fehlenden Separation der Fahrzeugelektronik und aufgrund von Materialverlusten entlang der Verwertungskette nur ein Teil dieses Potenzials genutzt. Andererseits ist das theoretische Gesamtpotenzial größer weil nur ein Teil der Altfahrzeuge in Deutschland verwertet wird. Die Erfassung ist also unvollständig.

Mit der Substitution äquivalenter Primärrohstoffmengen im globalen Marktmix (vgl. Tabelle 115) können durch die wiedergewonnenen Mengen an Zielmaterialien theoretisch treibhauswirksame Emissionen in Höhe von ca. 3,84 Mio. kg CO₂-Äquivalenten sowie der Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 56 Mio. MJ vermieden werden. Wie oben beschrieben, wird dieses Potenzial derzeit nicht genutzt.

Gliederung des Ausgangsprozesses in Verfahrensschritte

Abbildung 32 zeigt die Aufteilung der in dieser Untersuchung erarbeiteten Prozesskette für die Behandlung des Abfallstroms *Leiterplatten aus Altfahrzeugen* in die vier Verfahrensschritte Erfassung, Vorseparation, Aufbereitung und Verwertung.

Abbildung 32: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte



Definition der Ausgangssituation

Da keine belastbaren Informationen recherchiert werden konnten, wurde für den Verfahrensschritt Erfassung angenommen, dass durch die Nutzung bestehender Erfassungsstrukturen für Altfahrzeuge die Hälfte der angenommenen Gesamtmenge anfallender Altfahrzeuge, d.h. 500.000 Stück, erfasst und einer Demontage zugeführt werden.

Derzeit finden Demontage und Recycling von Leiterplatten aus Fahrzeugelektronik nur in geringem Umfang statt und zwar vor allem zur Ersatzteilgewinnung. Es wird daher näherungsweise davon ausgegangen, dass die Ausbeute an Leiterplatten aus Altfahrzeugen, die der Vorseparation zugeführt werden, bei 0 % liegt. Damit liegt auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Aufbereitung bei 0 %.

Separierte Leiterplatten werden zur Rückgewinnung der Zielmetalle und weiterer Metalle, insbesondere des Kupfers, Kupferhütten zugeführt. Die dort betriebenen Verwertungsprozesse generieren für die Zielmaterialien Gold, Silber, Platin und Palladium Metallrecyclingraten von > 95 %. Aus diesem Grund wird auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Verwertung auf 95 % gesetzt.

Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt aus dem Tabellenkalkulations-Tool, in dem beispielhaft die Eingabemaske für die Beschreibung und Bewertung (Ausbeute) einer Ausgangssituation dargestellt ist.

Abbildung 33: Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Definition der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Erfassung

Teilmenge 1 (bei nur einer Teilmenge = Abfallstrom)

Fahrzeugelektronik (Leiterplatten) aus Altfahrzeugen

Kommentar zum Verfahrensschritt

Ausgangssituation

Beschreibung

Nutzung bestehender Erfassungsstrukturen für Altfahrzeuge

Wert eingeben
 Abschätzung der Ausbeute (bezogen auf Inputmaterial) 50%

Sammlung von Maßnahmenoptionen zur Verbesserung der Ausgangssituation und Spezifizierung

Um die Ausbeute der Ausgangssituation zu erhöhen, wurden folgende Maßnahmenoptionen bzw. Verbesserungsansätze identifiziert:

Erfassung: **(E1)** Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.

(E2) Mehr Annahmestellen

Vorseparation: **(V1)** Einführung, Ausweitung und Optimierung einer manuellen Demontage von Elektronik-Komponenten

(V2) Ausbau einfach zu lokalisierender Elektronik-Komponenten im Rahmen bestehender Demontageprozesse

(V3) Mitarbeiterstärkung durch Schulungen und Visualisierung der relevanten Elektronik-Komponenten im Altfahrzeug

Aufbereitung: **(A1)** Abtrennung der Leiterplatten aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten über Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke

(A2) Automatische Sortierstrecken zur Separation kleinteiliger Leiterplattenbruchstücke

(A3) Gewinnung einer edelmetallhaltigen Metallfraktion aus anfallenden Filterstäuben

Verwertung: KEINE → Die Verwertungsprozesse in einer Kupferhütte sind heute technischer Standard und gut durchoptimiert. Metallrecyclingraten von > 95 % für die Zielmaterialien sind Stand der Technik und kaum mehr zu steigern.

Abschätzung der Verbesserung der Ausbeute des Verfahrensschritts ausgehend von der Ausgangssituation

In Tabelle 117 sind die Abschätzungen für die Steigerungen der Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zusammengefasst.

Tabelle 117: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Effekt auf die Ausbeute der Ausgangssituation
Erfassung	(E1) Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	+ 2 % ¹
	(E2) Mehr Annahmestellen	+1 % ¹
Vorseparation	(V1) Einführung, Ausweitung und Optimierung einer manuellen Demontage von Elektronik-Komponenten	+ 40 % ²
	(V2) Ausbau einfach zu lokalisierender Elektronik-Komponenten im Rahmen bestehender Demontageprozesse	+ 20 % ²
	(V3) Mitarbeiterstärkung durch Schulungen und Visualisierung der relevanten Elektronik-Komponenten im Altfahrzeug	+ 10 % ²
Aufbereitung	(A1) Abtrennung der Leiterplatten aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten über Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke	+ 30 % ³
	(A2) Automatische Sortierstrecken zur Separation kleinteiliger Leiterplattenbruchstücke	+ 10 % ²
	(A3) Gewinnung einer edelmetallhaltigen Metallfraktion aus anfallenden Filterstäuben	+ 1 % ²

¹ Vgl. Beschreibung der Erfassung im Abschnitt 4.1.1

² Annahme

³ Schüler et al. 2017; S. 21/26

Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen

In diesem Schritt werden die Maßnahmenoptionen und Verbesserungsansätze einer Variante des allgemeinen Maßnahmenkatalogs (vgl. Abschnitt 4.2.2) zugeordnet. Damit erfolgt eine qualitative Grundbewertung (Default-Werte) hinsichtlich der sechs vorgestellten Kriterien. War es nicht möglich, einem Kriterium einen Default-Wert zuzuweisen, ist dies gekennzeichnet und eine spezifische Abschätzung notwendig. Darüber hinaus können aber auch alle vorgegebenen Default-Werte der Kriterien bei Bedarf innerhalb der Attributsausprägungen (vgl. Tabelle 107) geändert werden.

Tabelle 118: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
Erfassung	(E1) Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	Optimierung bestehender Entsorgungsstrukturen ----- GWP 4; KEA 4; TOX 5; ANM 4; RC 3 ³ ; RA 3
	(E2) Mehr Annahmestellen	Einführung neuer Erfassungssysteme ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 4; RC 1 ³ ; RA 2
Vorseparation	(V1) Einführung, Ausweitung und Optimierung einer manuellen Demontage von Elektronik-Komponenten	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(V2) Ausbau einfach zu lokalisierender Elektronik-Komponenten im Rahmen bestehender Demontageprozesse	Optimierung/Intensivierung bestehender manueller Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
Aufbereitung	(V3) Mitarbeiterstärkung durch Schulungen und Visualisierung der relevanten Elektronik-Komponenten im Altfahrzeug	Optimierung/Intensivierung bestehender manueller Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(A1) Abtrennung der Leiterplatten aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten über Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke	Neue/zusätzliche einfache mechanische Prozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(A2) Automatische Sortierstrecken zur Separation kleinteiliger Leiterplattenbruchstücke	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 2; RA 2
	(A3) Gewinnung einer edelmetallhaltigen Metallfraktion aus anfallenden Filterstäuben	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 2; RA 2

¹ Zuordnung zu einer Variante aus dem allgemeinem Maßnahmenkatalog (vgl. Tabelle 99 bis Tabelle 105)

² Bewertung entsprechend der vorgestellten Default-Bewertung (GWP = Global Warming Potential, KEA = Kumulierter Energieaufwand; TOX =Toxikologie; ANM = Ausbeute Nicht-Zielmaterialien; RC = Realisierungschancen; RA: Realisierungsaufwand)

³ Spezifisch abgeschätzt

Abbildung 34 zeigt einen Ausschnitt aus dem Tabellenkalkulations-Tool, in dem beispielhaft die Eingabemaske für die Beschreibung und Bewertung (Steigerung der Ausbeute sowie Charakterisierung) der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze dargestellt ist.

Abbildung 34: Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Beschreibung und Bewertung der Maßnahmenoption A1 im Verfahrensschritt Aufbereitung

Maßnahmenoption / Verbesserungsansatz mit wesentlichen Auswirkungen auf diesen Verfahrensschritt

A1

Beschreibung (Einzelmaßnahme oder Maßnahmenkombinationen)

Abtrennung der Leiterplatten aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten über Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke

Wert eingeben

Steigerung der Ausbeute der Ausgangssituation um

Auswahl treffen

Zuordnung im allgemeinem Maßnahmenkatalog

Charakterisierung

	Default-Wert	Wert-Anpassung <small>(wenn notwendig oder spezifisch abzuschätzen)</small>
Global Warming Potential <small>(Belastung der Umwelt mit Treibhausgasen)</small>	4 (geringe Belastungen) bei Bedarf anpassen
Kumulierter Energieaufwand <small>(Verbrauch fossiler Brennstoffe und regenerativer Energieträger)</small>	4 (geringer Energiebedarf) bei Bedarf anpassen
Toxikologie <small>(Belastung von Luft, Böden, Gewässer)</small>	5 (sehr geringe/keine Belastungen) bei Bedarf anpassen
Effekt auf Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien <small>(im Vergleich zur Ausgangssituation)</small>	spezifisch abzuschätzen >>>	4 (besser gegenüber Ausgangssituation)
Realisierungschancen <small>(technischer Entwicklungsstand, Erfolgsaussichten)</small>	spezifisch abzuschätzen >>>	4 (gute Chancen)
Realisierungsaufwand <small>(Kosten)</small>	4 (geringe Kosten) bei Bedarf anpassen

Bestimmung der Ausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Im ersten Schritt wird - entsprechend dem Vorgehen bei einer Nutzwertanalyse - die Wichtigkeit (Gewichtung) eines Kriteriums von seiner Bewertung (Attributsausprägung) getrennt. Dafür wird zunächst festgelegt, welche relative Wichtigkeit den Kriterien beigemessen wird. Abbildung 35 zeigt die entsprechende Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der diesem Beispiel zugrundeliegenden Gewichtung.

Abbildung 35: Eingabemaske im Tabellenkalkulations-Tool mit der zugrundegelegten Gewichtung der Kriterien (Charakterisierungsparameter)

Gewichtung der Charakterisierungsparameter

Wert anpassen

	Gewichtung		Σ 100% !
Global Warming Potential <small>(Belastung der Umwelt mit Treibhausgasen)</small>	50%	▲ ▼	100% Grün = OK Rot = Fehler
Kumulierter Energieaufwand <small>(Verbrauch fossiler Brennstoffe und regenerativer Energieträger)</small>	0%	▲ ▼	
Toxikologie <small>(Belastung von Luft, Böden, Gewässer)</small>	5%	▲ ▼	
Effekt auf Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien <small>(im Vergleich zur Ausgangssituation)</small>	5%	▲ ▼	
Realisierungschancen <small>(technischer Entwicklungsstand, Erfolgsaussichten)</small>	10%	▲ ▼	
Realisierungsaufwand <small>(Kosten)</small>	30%	▲ ▼	

Im zweiten Schritt erfolgt für jede Maßnahmenoption und jedes Kriterium isoliert eine Bewertung. Zunächst werden separate Zwischenwerte berechnet, indem die erwartete Ausbeute einer Maßnahmenoption mit jeder Attributsausprägung der Kriterien multipliziert wird:

$$\text{Zwischenwert}_i = \text{Ausbeute} \times \text{Ausprägung}_i$$

Anschließend ergibt sich über die Multiplikation der Zwischenwerte mit den Gewichtungsfaktoren sowie die Summierung über alle Kriterien pro Maßnahmenoption ein Nutzwert, mit dem die jeweilige Maßnahmenoption bewertet wird:

$$\text{Nutzwert} = \sum_{i=6} \text{Zwischenwert}_i \times \text{Gewichtung}_i$$

Im dritten Schritt wird für jeden Verfahrensschritt eine Maßnahmenoption ausgewählt. Um den optimalen Rückgewinnungsgrad zu ermitteln, werden dies in der Regel die Maßnahmenoptionen mit der besten Maßnahmenbewertung sein. In diesem Beispiel sind das:

Erfassung: **(E1)** Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.

Vorseparation: **(V1)** Einführung, Ausweitung und Optimierung einer manuellen Demontage von Elektronik-Komponenten

Aufbereitung: **(A1)** Abtrennung der Leiterplatten aus den separierten Fahrzeugelektronik-Komponenten über Gehäuseöffnung mittels Prallmühle und anschließender Aussortierung der Leiterplatten und Leiterplattenbruchstücke

Abbildung 36 zeigt einen Ausschnitt aus dem Tabellenkalkulations-Tool, in dem beispielhaft die Maßnahmenbewertung und die Auswahlmöglichkeit dargestellt sind.

Abbildung 36: Maske im Tabellenkalkulations-Tool mit der Maßnahmenbewertung im Verfahrensschritt Aufbereitung

Vorseparation				
Es ist nur möglich, eine Maßnahme auszuwählen. Sollen mehrere Einzelmaßnahmen miteinander gekoppelt werden, muss diese Maßnahmenkombination im Tabellenblatt "Teilmenge 1 - Vorseparation" angelegt und charakterisiert werden.				
Auswahl treffen				
	Auswahl	Maßnahmen-bewertung	Erwartete Ausbeute	Beschreibung
V1	<input checked="" type="checkbox"/>	1,70	40%	Einführung, Ausweitung und Optimierung einer manuelle Demontage von Elektronik-Komponenten
V2	<input type="checkbox"/>	0,90	20%	Ausbau einfach zu lokalisierender Elektronik-Komponenten im Rahmen bestehender Demontageprozesse
V3	<input type="checkbox"/>	0,45	10%	Mitarbeiterstärkung durch Schulungen und Visualisierung der relevanten Elektronik-Komponenten im Altfahrzeug
V4	<input type="checkbox"/>	-	-	
V5	<input type="checkbox"/>	-	-	

Im vierten Schritt ergibt sich über die Multiplikation der erwarteten Ausbeuten der ausgewählten Maßnahmenoptionen in den vier Verfahrensschritten letztendlich die Gesamtausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen. Bei Auswahl der Maßnahmenoptionen mit der besten Bewertung ist dies eine Annäherung an einen optimalen Rückgewinnungsgrad.

In diesem Beispiel sind das

- 52 % im Verfahrensschritt Erfassung,
- 40 % im Verfahrensschritt Vorseparation,
- 30 % im Verfahrensschritt Aufbereitung und
- 95 % im Verfahrensschritt Verwertung.

Insgesamt erhält man mit den ausgewählten Maßnahmenoptionen eine Gesamtausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung der Maßnahmen von 5,9 %.

Quantifizierung des Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute

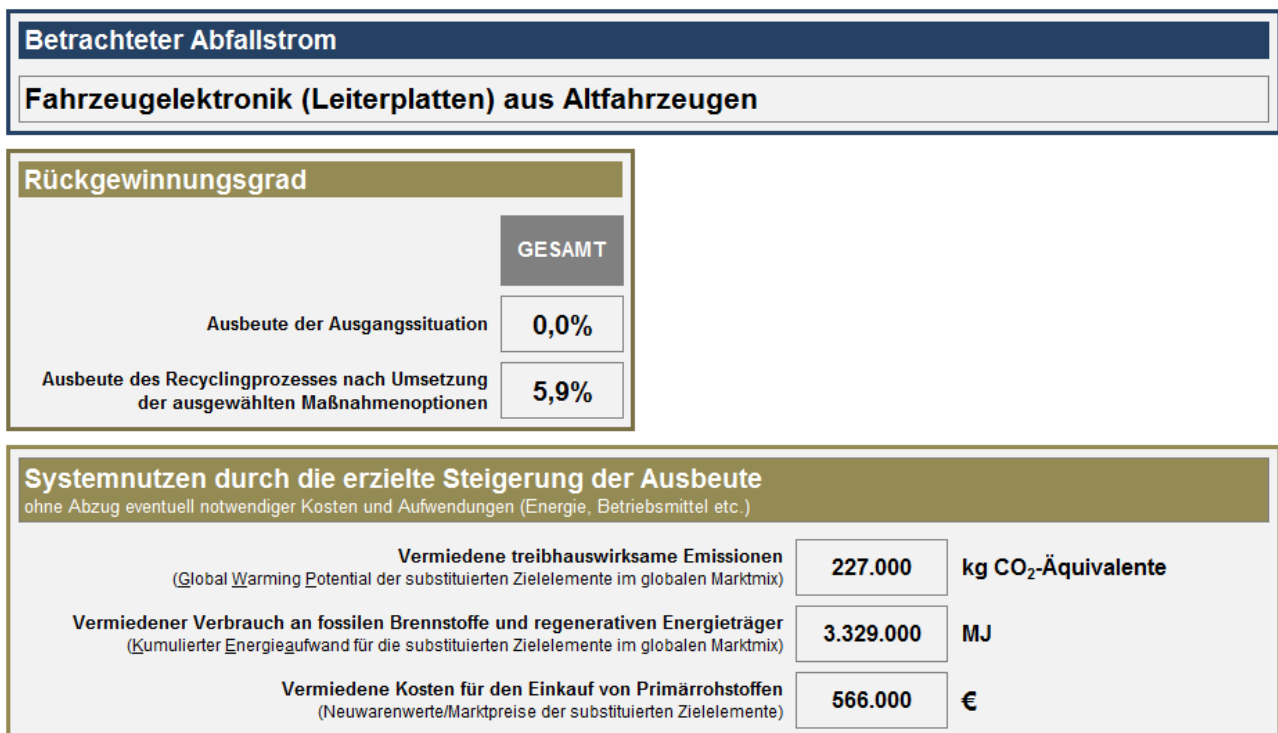
In der abschließenden Quantifizierung des Brutto-Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute wird die ermittelte Gesamtausbeute des Recyclingprozesses zu den ursprünglichen theoretischen Potenzialen an GWP, KEA und Neuwarenwerten im betrachteten Abfallstrom (vgl. Abschnitt 4.1.1) ins Verhältnis gesetzt.

Die mit der Ausbeute von 5,9% erhaltenen Zielmetalle entsprechen

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 227.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 3,3 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 566.000 €.

Abbildung 37 zeigt die Aufbereitung der Ergebnisse im Tabellenkalkulations-Tool.

Abbildung 37: Darstellung des Gesamtergebnisses im Tabellenkalkulations-Tool (Hinweis: insbesondere der Erfassungsgrad beruht auf wenig belastbaren Annahmen)



Es wird deutlich, dass es aufgrund der sich multiplizierenden Ausbeuten über die Verfahrensschritte der Recyclingkette sehr schwierig sein wird, hohe Rückgewinnungsgrade zu erzielen. Basis der gesamten Berechnung sind Annahmen hinsichtlich zu erwartender Ausbeuten durch die Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze in den vier Verfahrensschritten. Obwohl diese Ausbeuten mit Werten in

Höhe von 52 % (Erfassung), 40 % (Vorseparation), 30 % (Aufbereitung) und 95 % (Verwertung) jeweils im deutlich zweistelligen Prozentbereich liegen, wird über den gesamten Recyclingprozess unter den beschriebenen Annahmen ein Rückgewinnungsgrad lediglich in Höhe von 5,9 % ermittelt. Auch wenn die tatsächlich erfasste Menge von 1 Mio. Altfahrzeuge als Ausgangsmenge angesetzt wird, also mit der Annahme gearbeitet wird, dass derzeit 100% der Altfahrzeuge der Verwertungskette zugeführt werden, läge der Rückgewinnungsgrad nur bei 11,4 %.

Die angenommenen Ausbeuten der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze beruhen auf eher konservativen Abschätzungen. Um einschätzen zu können, welchen Effekt es hätte, stattdessen mit sehr optimistischen Einschätzungen zu arbeiten, wird angenommen, dass

- durch eine optimale Erfassung die (eher willkürlich angenommene) Ausbeute der Ausgangssituation (50 %) auf 85 % gesteigert werden kann (Hinweis: im Gegensatz zum weiter unten dargestellten Beispiel NdFeB-Magnete variiert das Potenzial hier tatsächlich, da die tatsächlich erfasste Menge Altfahrzeuge in der Ausgangssituation bekannt ist),
- durch optimale Vorseparation in diesem Verfahrensschritt eine spezifische Ausbeute von 60 % erreicht werden kann,
- durch optimale Aufbereitung in diesem Verfahrensschritt eine spezifische Ausbeute von 85 % erreicht werden kann und
- durch optimale Verwertung die angenommene Ausbeute der Ausgangssituation auf 86 % gesteigert werden kann.

Tabelle 119 fasst die verschiedenen für diesen Abfallstrom angenommenen Ausbeuten noch einmal zusammen.

Tabelle 119: Angenommene Ausbeuten im edelmetallhaltigen Abfallstrom *Leiterplatten aus Altfahrzeugen*

Verfahrensschritt	Ausgangssituation	Nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze	
		bei konservativ abgeschätzten Ausbeuten	bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeuten
Erfassung	50 %	52 %	85 %
Vorseparation	0 %	40 %	60 %
Aufbereitung	0 %	30 %	85 %
Verwertung	95 %	95 %	96 %
GESAMT	0 %	5,9 %	41,6 %

Tabelle 119 zeigt, dass der zu erwartende Rückgewinnungsgrad auch bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeuten in den vier Verfahrensschritten über den gesamten Recyclingprozess bei deutlich unter 50% liegt. Die mit dem ermittelten Rückgewinnungsgrad von 41,6% erhaltenen Zielmetalle entsprechen

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 1,6 Mio. kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 23,4 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 3,97 Mio. €.

Gegenüber den Ergebnissen bei konservativ abgeschätzten Ausbeuten entspricht das jeweils einer Verbesserung um etwa das 6fache.

Zwischenfazit

In der Ausgangssituation für den edelmetallhaltigen Abfallstrom *Leiterplatten aus Altfahrzeugen* wird davon ausgegangen, dass derzeit die betrachteten Zielmetalle in den Leiterplatten, also Gold, Silber, Palladium und Platin, während des Recyclingprozesses für Altfahrzeuge vollständig verloren gehen. Durch Umsetzung verschiedener Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze in den Verfahrensschritten kann für den gesamten Recyclingprozess mit eher konservativ abgeschätzten Ausbeutesteigerungen ein Rückgewinnungsgrad (Gesamtausbeute) von 5,9 % erzielt werden. Das entspricht einem Potenzial an Einsparungen an treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 227.000 kg CO₂-Äquivalenten, an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträger in Höhe von ca. 3,3 Mio. MJ sowie an Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 566.000 €.

Sehr optimistische Annahmen hinsichtlich der Steigerung der Ausbeuten für die gleichen Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zeigen, dass für den gesamten Recyclingprozess auch unter sehr günstigen Bedingungen ein Rückgewinnungsgrad deutlich über 42 % kaum erreichbar sein dürfte. In diesem Falle wäre das Potenzial an Einsparungen etwa um den Faktor sechs höher als bei eher konservativen Annahmen.

In beiden Fällen ergibt sich der tatsächliche Nutzen, wenn von diesen Potenzialen die entsprechenden Aufwände für die gesamte Recycling-Prozesskette subtrahiert werden.

4.2.5 Vorstellung der Funktionsweise des Tabellenkalkulations-Tools am Beispiel eines Abfallstroms mit drei Teilmengen (NdFeB-Magnete)

Im zweiten Beispiel wird das Tabellenkalkulations-Tool auf den seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom NdFeB-Magnete angewendet. Dieser Abfallstrom umfasst mehrere Teilmengen, von denen nachfolgend die drei mengenmäßig größten, nämlich Magnete aus Industriemotoren, Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw sowie Magnete aus IT (zusammen etwa 85 % des Gesamt mengen- und des Gesamtwertpotenzials), betrachtet werden.

Die in den derzeit erfassten Teilmengen enthaltene Gesamtmenge an NdFeB-Magneten wird für das Jahr 2020 auf insgesamt 402 t/a mit künftig steigender Tendenz abgeschätzt. Das Aufkommen der betrachteten Teilmengen und die angenommenen Zielmetallgehalte sind in Tabelle 120 zusammengefasst.

Tabelle 120: Aufkommen und Zusammensetzung der betrachteten NdFeB-Magnete

Teilmenge	Aufkommen [t/a]	Dysprosium [Gew.-%]	Neodym [Gew.-%]	Praseodym [Gew.-%]
Magnete aus Industriemotoren	60	10	20	-
Magnete aus IT	275	2,3	29	-
Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw	67	1,0	28	1,0

Basierend auf den Neuwarenpreisen der Zielmetalle (vgl. Tabelle 116) wird das Wertpotenzial der Gesamtmenge an NdFeB-Magneten mit ca. 10 Mio. € abgeschätzt. Allerdings wird dieses Potenzial derzeit aufgrund der nahezu vollständig fehlenden Separation, Aufbereitung und Verwertung solcher Magnete nicht genutzt. Andererseits ist das theoretische Gesamtpotenzial größer weil nur ein Teil der in Deutschland anfallenden NdFeB-Magnet-haltigen Abfälle getrennt erfasst werden.

Mit der Substitution äquivalenter Primärrohstoffmengen im globalen Marktmix (vgl. Tabelle 115) können durch die wiedergewonnenen Mengen an Zielmaterialien theoretisch treibhauswirksame

Emissionen in Höhe von ca. 3,8 Mio. kg CO₂-Äquivalenten sowie der Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 86,1 Mio. MJ vermieden werden. Dieses Potenzial wird derzeit nicht genutzt.

Die spezifischen Potenziale der betrachteten Teilmengen sind in Tabelle 121 zusammengefasst.

Tabelle 121: Wertpotenziale, vermeidbare treibhauswirksame Emissionen sowie der theoretisch vermeidbare Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern der betrachteten NdFeB-Magnete

Teilmenge	Wertpotenzial [€]	GWP [kg CO ₂ -Äqu.]	KEA [MJ]
Magnete aus Industriemotoren	2,6 Mio.	684.000	14,7 Mio.
Magnete aus IT	6,1 Mio.	2,55 Mio.	58,3 Mio.
Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw	1,3 Mio.	567.000	13,1 Mio.

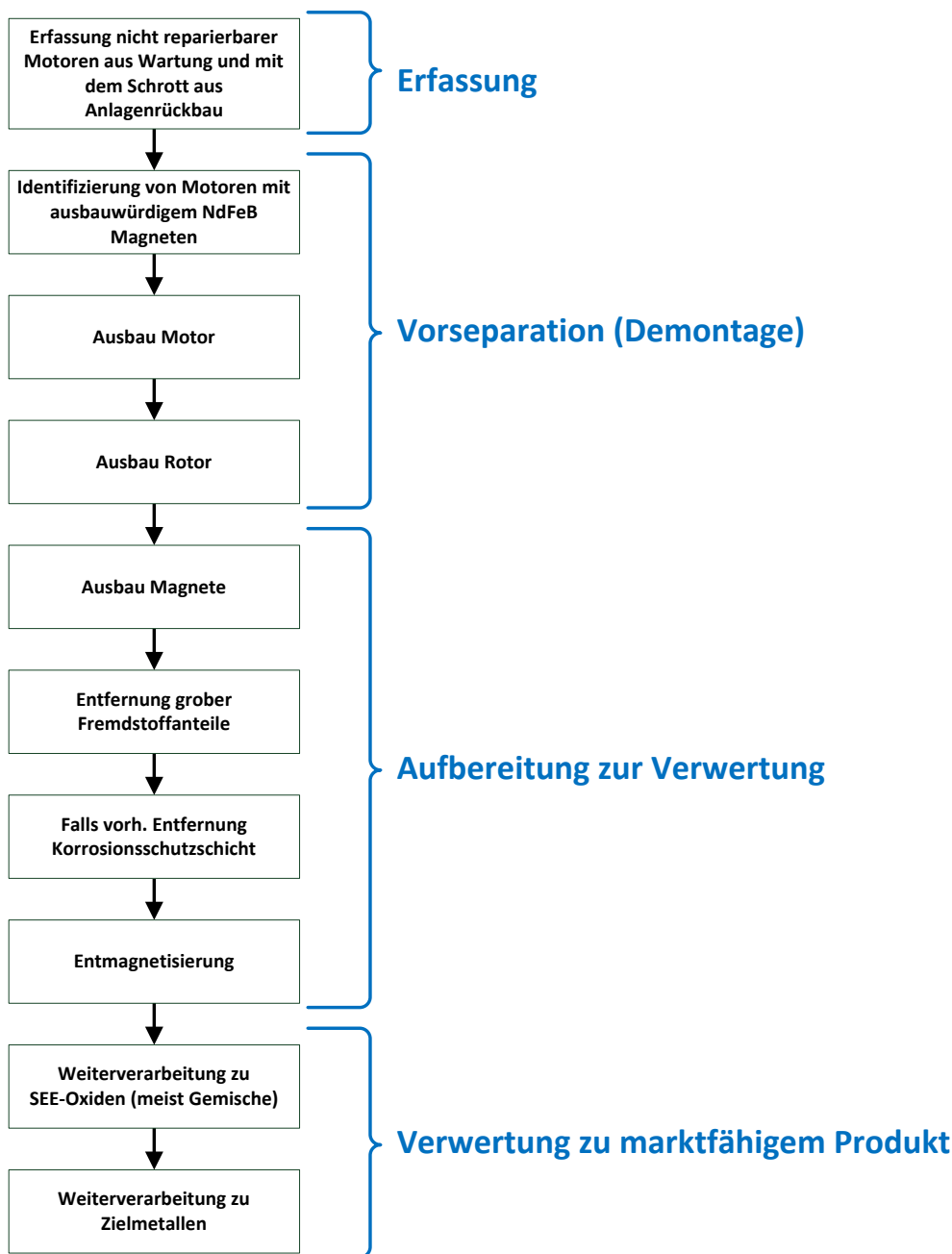
4.2.5.1 Teilmenge 1: Magnete aus Industriemotoren

Magnete aus Industriemotoren entsprechen etwa 15 % der betrachteten Gesamtmenge an NdFeB-Magneten.

Gliederung des Ausgangsprozesses in Verfahrensschritte

Abbildung 38 zeigt die Aufteilung der in dieser Untersuchung erarbeiteten Prozesskette für die Behandlung der Teilmenge *Magnete aus Industriemotoren* des Abfallstroms *NdFeB-Magnete* in die Verfahrensschritte Erfassung, Vorseparation, Aufbereitung und Verwertung.

Abbildung 38: Magnete aus Industriemotoren: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte



Definition der Ausgangssituation

Im Verfahrensschritt Erfassung wird angenommen, dass ca. 30 % der Menge nicht reparierbarer Motoren aus der Wartung sowie der Motoren im Schrott aus dem Rückbau von Industrieanlagen zur Demontage weitergeben werden. Es wurde hier eine eher willkürliche Annahme getroffen, da entsprechende publizierte Daten nicht recherchiert werden konnten. Wesentliche Teile der NdFeB-Magnete enthaltenen Anlagen werden als Gebrauchtgeräte exportiert, ein großer Teil der übrigen Motoren wird nicht separiert.

In Demontagebetrieben werden Motoren zerkleinert und industriell/automatisiert in verschiedene Metallfraktionen getrennt. Zum Teil finden zur Separation von Kupferdraht auch ein Ausbau von Rotoren und die anschließende separate Verschrottung mit dem Mischschrott statt. Alle Verfahrenswege führen zum Verlust der Magnete über die FE-Fraktion. Die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Vorseparation wird deshalb auf 0 % gesetzt.

Derzeit findet keine Aufbereitung von NdFeB-Magneten zu einer separaten und entmagnetisierten Magnetfraktion statt. Aus diesem Grund ist auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Aufbereitung gleich 0 %.

Ebenso findet keine Verwertung von Magnetwerkstoffen zu marktfähigen neodym- oder dysprosiumhaltigen Produkte statt. Damit ist auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Verwertung gleich 0 %.

Sammlung von Maßnahmenoptionen zur Verbesserung der Ausgangssituation und Spezifizierung

Um die Ausbeute der Ausgangssituation zu erhöhen, wurden folgende Maßnahmenoptionen bzw. Verbesserungsansätze identifiziert:

Erfassung: KEINE → Verbesserungsansätze mit wesentlichen Auswirkungen auf die Sammlung von Industriemotoren oder die Erfassung von Maschinen und Anlagen, die Motoren mit Magneten enthalten, konnten nicht identifiziert werden.

Vorseparation: **(V1)** Manuelle Demontage auf Basis vorhandener Kenntnisse zu Motoren

(V2) Manuelle Demontage bei Kennzeichnung von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren

(V3) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren

(V4) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"

(V5) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in alle Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"

Aufbereitung: **(A1)** Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)

(A2) Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete

(A3) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Handgerät

(A4) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Sortierstrecke

Verwertung: **(P1)** Rückgewinnung der Magnetlegierungen bei definierten Magnetzusammensetzungen (Wasserstoffversprödung und Zerkleinerung per Jetmühle)

(P2) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

(P3) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Abschätzung der Verbesserung der Ausbeute des Verfahrensschritts ausgehend von der Ausgangssituation

In Tabelle 122 sind die Abschätzungen für die Steigerungen der Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zusammengefasst.

Tabelle 122: Magnete aus Industriemotoren: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Effekt auf die Ausbeute der Ausgangssituation
Vorseparation	(V1) Manuelle Demontage auf Basis vorhandener Kenntnisse zu Motoren	+ 5 % ¹
	(V2) Manuelle Demontage bei Kennzeichnung von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren	+ 10 % ¹
	(V3) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren	+ 20 % ¹
	(V4) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"	+ 30 % ¹
	(V5) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in alle Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"	+ 50 % ¹
Aufbereitung	(A1) Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)	+ 30 % ¹
	(A2) Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete	+ 50 % ¹
	(A3) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Handgerät	+ 20 % ¹
	(A4) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Sortierstrecke	+ 30 % ¹
Verwertung	(P1) Rückgewinnung der Magnetlegierungen bei definierten Magnetzusammensetzungen (Wasserstoffversprödung und Zerkleinerung per Jetmühle)	+ 10 % ¹
	(P2) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 85 % ¹
	(P3) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 75 % ¹

¹ Annahme

Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen

Tabelle 123 zeigt die Zuordnung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zu den Varianten im allgemeinen Maßnahmenkatalog (vgl. Abschnitt 4.2.2) sowie die daraus resultierende – oder spezifisch abgeschätzte - Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen).

Tabelle 123: Magnete aus Industriemotoren: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
Vorseparation	(V1) Manuelle Demontage auf Basis vor-	Optimierung/Intensivierung bestehender

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
	handener Kenntnisse zu Motoren	manueller Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 5 ³ ; RA 4
	(V2) Manuelle Demontage bei Kennzeichnung von NdFeB-Magnet-haltigen Motoren	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(V3) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 3 ³ ; RA 3
	(V4) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in größere Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 3 ³ ; RA 3
	(V5) Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in alle Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"	Neue/zusätzliche aufwendigere manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 2
Aufbereitung	(A1) Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(A2) Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 2 ³
	(A3) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Handgerät	Neue/zusätzliche einfache manuelle Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(A4) Sortierung der Magnete nach Zusammensetzung mittels Sortierstrecke	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 2; RA 2
Verwertung	(P1) Rückgewinnung der Magnetlegierungen bei definierten Magnetzusammensetzungen (Wasserstoffversprödung und Zerkleinerung per Jetmühle)	Neue/zusätzliche aufwendigere mechanische Prozesse ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 3 ³ ; RC 2; RA 2
	(P2) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mä-	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
	Big aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 2
	(P3) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse ----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 1 ³

¹ Zuordnung zu einer Variante aus dem allgemeinem Maßnahmenkatalog (vgl. Tabelle 99 bis Tabelle 105)

² Bewertung entsprechend der vorgestellten Default-Bewertung (GWP = Global Warming Potential, KEA = Kumulierter Energieaufwand; TOX =Toxikologie; ANM = Ausbeute Nicht-Zielmaterialien; RC = Realisierungschancen; RA: Realisierungsaufwand)

³ Spezifisch abgeschätzt

Bestimmung der Ausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

In Tabelle 124 ist die Gewichtung der Bewertungskriterien, die diesem Beispiel zugrunde liegt, dargestellt.

Tabelle 124: zugrundegelegte Gewichtung der Kriterien (Charakterisierungsparameter)

Kriterium	Gewichtung
Global Warming Potential	50 %
Kumulierter Energieaufwand	0 %
Toxikologie	5 %
Effekt auf Ausbeute an Nicht-Zielmaterialien	5 %
Realisierungschancen	10 %
Realisierungsaufwand	30 %

Die Verrechnung dieser Gewichtungswerte mit der Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen) aus Tabelle 123 ergibt für die Verfahrensschritte folgende Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze mit der jeweils besten Maßnahmenbewertung (Nutzwert):

Vorseparation: **(V5)** Manuelle Demontage bei demontagefreundlichem Einbau von NdFeB-Magnete in alle Motoren und Kennzeichnung auf Typenschild "NdFeB leicht ausbaubar"

Aufbereitung: **(A2)** Manueller Ausbau der Magnete, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete

Verwertung: **(P2)** Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Daraus resultieren potenzielle spezifische Ausbeuten in Höhe von

- 30 % im Verfahrensschritt Erfassung,
- 50 % im Verfahrensschritt Vorseparation,
- 50 % im Verfahrensschritt Aufbereitung und
- 85 % im Verfahrensschritt Verwertung.

Werden die ausgewählten Maßnahmen umgesetzt, liegt damit die Gesamtausbeute für den betrachteten Recyclingprozess für Magnete aus Industriemotoren bei ca. 6,4 %.

Quantifizierung des Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute

Durch die erzielte Steigerung der Gesamtausbeute des Recyclingprozesses für NdFeB-Magnete aus Industriemotoren von 0 % in der Ausgangssituation auf 6,4 % nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen, können bei einem Aufkommen von ca. 60 t/a mit ca. 20 Gew.-% Neodym und ca. 10 Gew.-% Dysprosium (vgl. Tabelle 120) Zielmetallmengen zurückgewonnen werden, die

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 44.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 936.000 MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 166.000 € entsprechen.

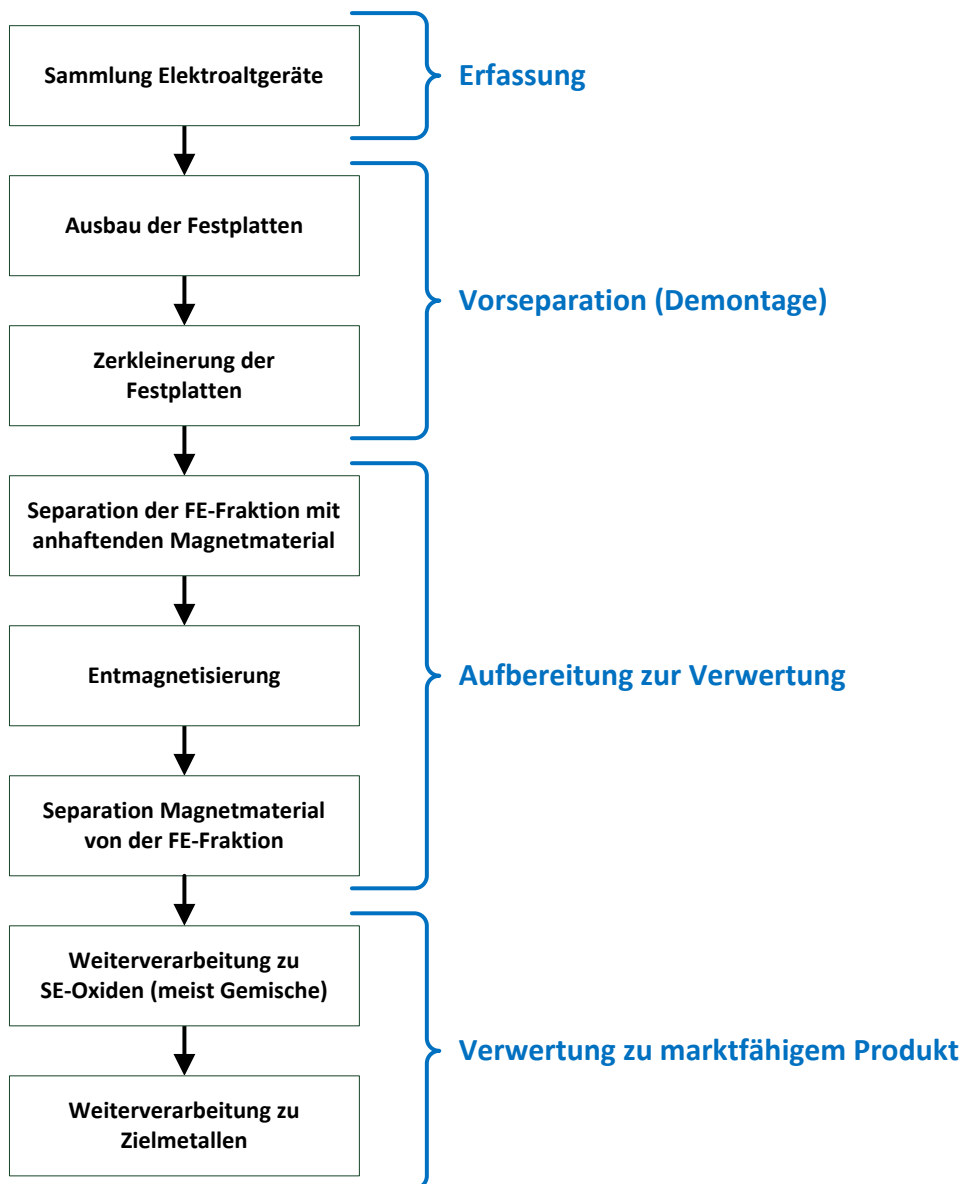
4.2.5.2 Teilmenge 2: Magnete aus IT (Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher)

Magnete aus IT machen ungefähr 68 % der betrachteten Gesamtmenge an NdFeB-Magnete aus.

Gliederung des Ausgangsprozesses in Verfahrensschritte

Abbildung 39 zeigt die Aufteilung der in dieser Untersuchung erarbeiteten Prozesskette für die Behandlung der Teilmenge *Magnete aus IT-Komponenten (Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher)* des Abfallstroms *NdFeB-Magnete* in die Verfahrensschritte Erfassung, Vorseparation, Aufbereitung und Verwertung.

Abbildung 39: Magnete aus IT-Komponenten am Beispiel Festplatten: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte



Definition der Ausgangssituation

Im Verfahrensschritt Erfassung wird angenommen, dass durch die Nutzung bestehender Erfassungsstrukturen (ca. 85 Gew.-% öRE, ca. 14 Gew.-% gewerbliche Sammlung, ca. 1 Gew.-% Eigenrücknahme durch Handel und Hersteller) ca. 50 % der derzeit anfallenden Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher erfasst und einer Vorseparation (Demontage) übergeben werden. Es musste hier eine wenig belastbare Annahme getroffen werden, da entsprechende publizierte Daten nicht recherchiert werden konnten.

In Sortier- und Demontagebetrieben erfolgen eine Vor- bzw. Aufbereitung der IT-Komponenten zur Wiederverwendung oder eine Schadstoffentfrachtung sowie eine Wertstoffseparation, allerdings ohne die Separation von NdFeB-Magneten. Diese gehen vollständig verloren. Die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Vorseparation wird deshalb auf 0 % gesetzt.

Bei Aufbereitungsprozessen erfolgt nach der mechanischen Zerkleinerung mit anderen Geräteteilen eine Sortierung des Schredder-Outputs. Dabei haften Magneteile an Eisenpartikeln und gehen über

die FE-Fraktion komplett verloren. Aus diesem Grund ist auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Aufbereitung gleich 0 %.

Ebenso findet keine Verwertung von Magnetwerkstoffen zu marktfähigen Neodym- oder Dysprosiumhaltigen Produkten statt. Damit ist auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Verwertung gleich 0 %.

Sammlung von Maßnahmenoptionen zur Verbesserung der Ausgangssituation und Spezifizierung

Um die Ausbeute der Ausgangssituation zu erhöhen, wurden folgende Maßnahmenoptionen bzw. Verbesserungsansätze identifiziert:

- Erfassung: **(E11)** Steigerung der Effizienz der Sammlung über örE durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, bessere interne Stoffstromführung, Kontrolle, Arbeitsmittel, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.
(E12) Stärkung der Eigenrücknahme durch Handel/Händler
- Vorseparation: **(V11)** Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Festplatten/Lautsprechern
- Aufbereitung: **(A11)** Zerkleinerung der Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile
- Verwertung: **(P11)** Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)
(P12) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Abschätzung der Verbesserung der Ausbeute des Verfahrensschritts ausgehend von der Ausgangssituation

In Tabelle 125 sind die Abschätzungen für die Steigerungen der Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zusammengefasst.

Tabelle 125: Magnete aus IT-Komponenten: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Effekt auf die Ausbeute der Ausgangssituation
Erfassung	(E11) Steigerung der Effizienz der Sammlung über örE durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, bessere interne Stoffstromführung, Kontrolle, Arbeitsmittel, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	+ 15 % ¹
	(E12) Stärkung der Eigenrücknahme durch Handel/Händler	+ 10 % ¹
Vorseparation	(V11) Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Festplatten/ Lautsprechern	+ 20 % ¹
Aufbereitung	(A11) Zerkleinerung der Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der	+ 60 % ¹

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Effekt auf die Ausbeute der Ausgangssituation
	NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile	
Verwertung	(P11) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 85 % ¹
	(P12) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 75 % ¹

¹ Annahme

Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen

Tabelle 126 zeigt die Zuordnung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zu den Varianten im allgemeinen Maßnahmenkatalog (vgl. Abschnitt 4.2.2) sowie die daraus resultierende – oder spezifisch abgeschätzte - Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen).

Tabelle 126: Magnete aus IT-Komponenten: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
Erfassung	(E11) Steigerung der Effizienz der Sammlung über öRE durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, bessere interne Stoffstromführung, Kontrolle, Arbeitsmittel, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	Optimierung bestehender Erfassungsstrukturen ----- GWP 4; KEA 4; TOX 5; ANM 4; RC 3 ³ ; RA 3
	(E12) Stärkung der Eigenrücknahme durch Handel/Händler	Einführung neuer Erfassungssysteme ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 3; RC 2; RA 2
Vorseparation	(V11) Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Festplatten/Lautsprechern	Optimierung/Intensivierung bestehender manueller Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 2 ³ ; RA 4
Aufbereitung	(A11) Zerkleinerung der Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
Verwertung	(P11) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse ----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 2
	(P12) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometal-	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
	lurgischer Prozess)	----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 1 ³

¹ Zuordnung zu einer Variante aus dem allgemeinem Maßnahmenkatalog (vgl. Tabelle 99 bis Tabelle 105)

² Bewertung entsprechend der vorgestellten Default-Bewertung (GWP = Global Warming Potential, KEA = Kumulierter Energieaufwand; TOX =Toxikologie; ANM = Ausbeute Nicht-Zielmaterialien; RC = Realisierungschancen; RA: Realisierungsaufwand)

³ Spezifisch abgeschätzt

Bestimmung der Ausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Die Gewichtung der Bewertungskriterien, die diesem Beispiel zugrunde liegt, ist in Tabelle 124 dargestellt.

Die Verrechnung dieser Gewichtungswerte mit der Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen) aus Tabelle 126 ergibt für die Verfahrensschritte folgende Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze mit der jeweils besten Maßnahmenbewertung (Nutzwert):

Erfassung: **(E11)** Steigerung der Effizienz der Sammlung über örE durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, bessere interne Stoffstromführung, Kontrolle, Arbeitsmittel, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.

Vorseparation: **(V11)** Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Festplatten/Lautsprechern

Aufbereitung: **(A11)** Zerkleinerung der Festplatten, Kopfhörer und Lautsprecher mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile

Verwertung: **(P11)** Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Daraus resultieren potenzielle spezifische Ausbeuten in Höhe von

- 65 % im Verfahrensschritt Erfassung,
- 20 % im Verfahrensschritt Vorseparation,
- 60 % im Verfahrensschritt Aufbereitung und
- 85 % im Verfahrensschritt Verwertung.

Werden die ausgewählten Maßnahmen umgesetzt, liegt damit die Gesamtausbeute für den betrachteten Recyclingprozess für Magnete aus IT-Komponenten bei ca. 6,6 %.

Quantifizierung des Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute

Durch die erzielte Steigerung der Gesamtausbeute des Recyclingprozesses für NdFeB-Magnete aus IT-Komponenten von 0 % in der Ausgangssituation auf 6,6 % nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen, können bei einem Aufkommen von ca. 275 t/a mit ca. 29 Gew.-% Neodym und ca. 2,3 Gew.-% Dysprosium (vgl. Tabelle 120) können Zielmetallmengen zurückgewonnen werden, die

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 169.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 3,8 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 409.000 € entsprechen.

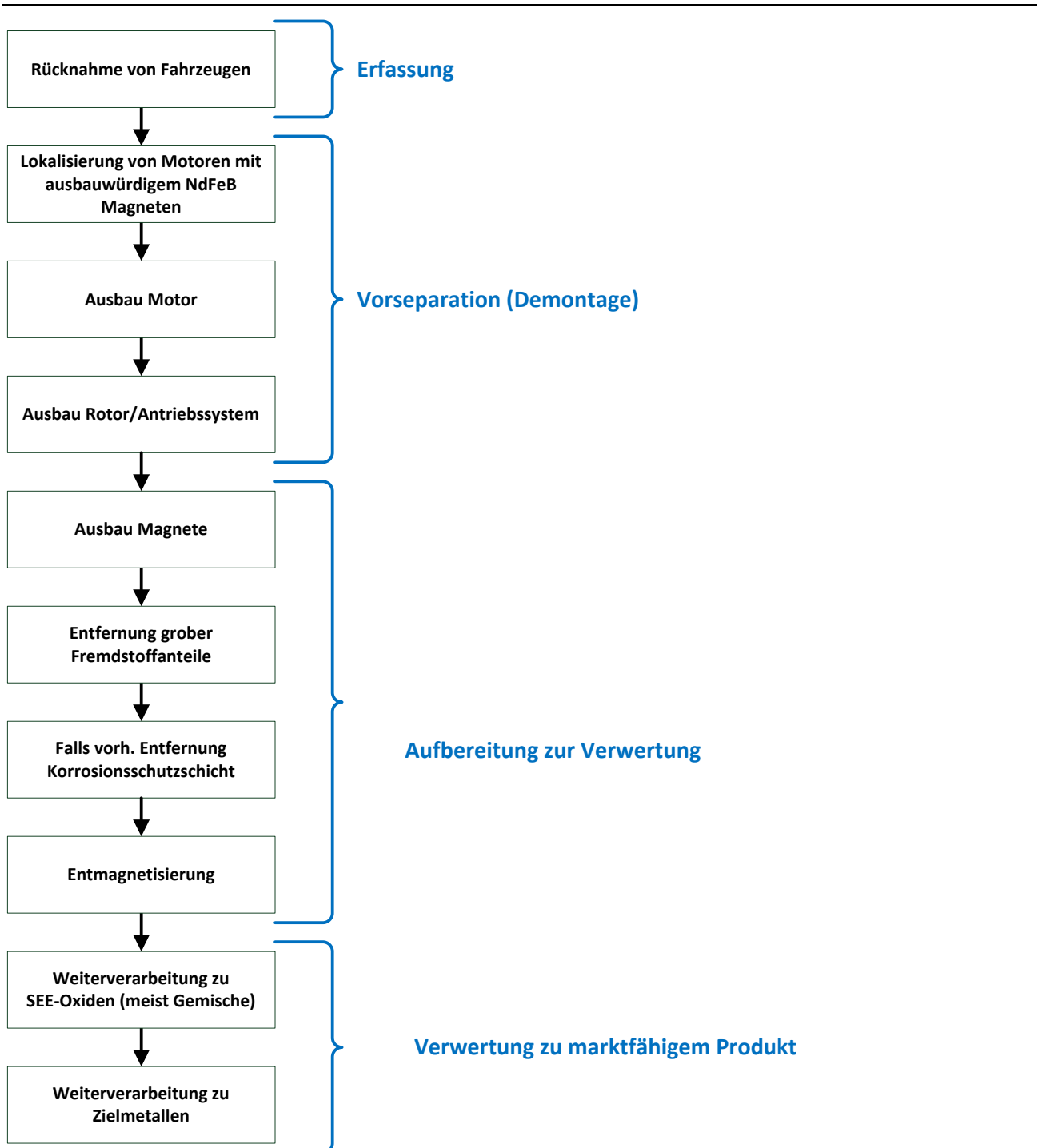
4.2.5.3 Teilmenge 3: Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw

Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw stellen ungefähr 17 % der betrachteten Gesamtmenge an NdFeB-Magneten.

Gliederung des Ausgangsprozesses in Verfahrensschritte

Abbildung 40 zeigt die Aufteilung der in dieser Untersuchung erarbeiteten Prozesskette für die Behandlung der Teilmenge *Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw* des Abfallstroms *NdFeB-Magnete* in die Verfahrensschritte Erfassung, Vorseparation, Aufbereitung und Verwertung.

Abbildung 40: Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Gliederung der Prozesskette in vier Verfahrensschritte



Definition der Ausgangssituation

Da keine belastbaren Informationen recherchiert werden konnten, wurde für den Verfahrensschritt Erfassung angenommen, dass durch die Nutzung bestehender Erfassungsstrukturen für Altfahrzeuge die Hälfte der angenommenen Gesamtmenge anfallender Altfahrzeuge, d.h. 500.000 Stück, erfasst und einer Demontage zugeführt werden.

Derzeit finden Demontage und Recycling von kleinen E-Motoren aus Pkw nur in geringem Umfang statt und zwar zur Ersatzteilgewinnung. Es wird daher näherungsweise davon ausgegangen, dass die Ausbeute an NdFeB-Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw, die der Vorseparation zugeführt werden, bei 0 % liegt. Damit liegt auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Aufbereitung bei 0 %.

Ebenso findet keine Verwertung von Magneten aus kleinen E-Motoren aus Pkw statt. Damit ist auch die Ausbeute der Ausgangssituation im Verfahrensschritt Verwertung gleich 0 %.

Sammlung von Maßnahmenoptionen zur Verbesserung der Ausgangssituation und Spezifizierung

Um die Ausbeute der Ausgangssituation zu erhöhen, wurden folgende Maßnahmenoptionen bzw. Verbesserungsansätze identifiziert:

- Erfassung: **(E21)** Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.
 (E22) Mehr Annahmestellen
- Vorseparation: **(V21)** Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Elektromotoren
- Aufbereitung: **(A21)** Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)
 (A22) Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete
 (A23) Zerkleinerung kleinerer Motoren mit anschließender Abtrennung der magnetischen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile
- Verwertung: **(P21)** Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)
 (P22) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Abschätzung der Verbesserung der Ausbeute des Verfahrensschritts ausgehend von der Ausgangssituation

In Tabelle 127 sind die Abschätzungen für die Steigerungen der Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zusammengefasst.

Tabelle 127: Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Abschätzung des Effekts auf die Ausbeute der Ausgangssituation bei Umsetzung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Effekt auf die Ausbeute der Ausgangssituation
Erfassung	(E21) Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	+ 2 % ¹
	(E22) Mehr Annahmestellen	+1 % ¹
Vorseparation	(V21) Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Elektromotoren	+ 30 % ¹
Aufbereitung	(A21) Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)	+ 30 % ¹
	(A22) Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete	+ 50 % ¹
	(A23) Zerkleinerung kleinerer Motoren mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile	+ 60 % ¹
Verwertung	(P21) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 85 % ¹
	(P22) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	+ 75 % ¹

¹ Annahme

Qualitative Bewertung der Maßnahmenoptionen

Tabelle 128 zeigt die Zuordnung der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze zu den Varianten im allgemeinen Maßnahmenkatalog (vgl. Abschnitt 4.2.2) sowie die daraus resultierende – oder spezifisch abgeschätzte - Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen).

Tabelle 128: Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw: Charakterisierung der Maßnahmenoptionen

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
Erfassung	(E21) Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.	Optimierung bestehender Entsorgungsstrukturen ----- GWP 4; KEA 4; TOX 5; ANM 4; RC 3 ³ ; RA 3
	(E22) Mehr Annahmestellen	Einführung neuer Erfassungssysteme ----- GWP 3; KEA 3; TOX 5; ANM 4; RC 1 ³ ; RA 2
Vorseparation	(V21) Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Elektromotoren	Optimierung/Intensivierung bestehender manueller Prozesse ----- GWP 5; KEA 5; TOX 5; ANM 4 ³ ; RC 2 ³ ; RA 4
Aufbereitung	(A21) Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie dezentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C)	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
	(A22) Manueller Ausbau der Magnete aus größeren Motoren, Entfernung grober Fremdstoffanteile sowie zentrale Entmagnetisierung (thermisch, ca. 350°C) mit Einsatz eines geeigneten Transport- und Behältersystems für NdFeB-Magnete	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 3 ³ ; RA 2 ³
	(A23) Zerkleinerung kleinerer Motoren mit anschließender Abtrennung der magnetischen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile	Neue/zusätzliche einfache Niedertemperaturprozesse ----- GWP 4; KEA 4; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 4 ³ ; RA 3
Verwertung	(P21) Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse ----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 2
	(P22) Aufbereitung zu reinen Seltenerdmetallen (sehr aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)	Neue/zusätzliche aufwendigere hydrometallurgische Prozesse ----- GWP 2; KEA 2; TOX 4; ANM 3 ³ ; RC 2 ³ ; RA 1 ³

Verfahrensschritt	Maßnahmenoption/Verbesserungsansatz	Zuordnung ¹ und Bewertung ²
-------------------	-------------------------------------	---

¹ Zuordnung zu einer Variante aus dem allgemeinen Maßnahmenkatalog (vgl. Tabelle 99 bis Tabelle 105)

² Bewertung entsprechend der vorgestellten Default-Bewertung (GWP = Global Warming Potential, KEA = Kumulierter Energieaufwand; TOX = Toxikologie; ANM = Ausbeute Nicht-Zielmaterialien; RC = Realisierungschancen; RA: Realisierungsaufwand)

³ Spezifisch abgeschätzt

Bestimmung der Ausbeute des Recyclingprozesses nach Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Die Gewichtung der Bewertungskriterien, die diesem Beispiel zugrunde liegt, ist in Tabelle 124 dargestellt.

Die Verrechnung dieser Gewichtungswerte mit der Bewertung der Kriterien (Attributsausprägungen) aus Tabelle 128 ergibt für die Verfahrensschritte folgende Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze mit der jeweils besten Maßnahmenbewertung (Nutzwert):

- Erfassung: **(E21)** Steigerung der Effizienz der Erfassungsstrukturen durch Anpassung von Öffnungszeiten, Werbung, Mitarbeiterschulung, Information am Arbeitsplatz, etc.
- Vorseparation: **(V21)** Ausweitung und Optimierung der manuellen Demontage von Elektromotoren
- Aufbereitung: **(A23)** Zerkleinerung kleinerer Motoren mit anschließender Abtrennung der magnethaltigen FE-Fraktion, dezentrale Entmagnetisierung der NdFeB-Magnete (thermisch, ca. 350°C) und automatische Abtrennung durch abermalige Magnetseparation der FE-Anteile
- Verwertung: **(P21)** Aufbereitung zu Seltenerdmetalloxid-Konzentraten (Gemischen) (mäßig aufwendiger hydrometallurgischer Prozess)

Daraus resultieren potenzielle spezifische Ausbeuten in Höhe von

- 52 % im Verfahrensschritt Erfassung,
- 30 % im Verfahrensschritt Vorseparation,
- 60 % im Verfahrensschritt Aufbereitung und
- 85 % im Verfahrensschritt Verwertung.

Werden die ausgewählten Maßnahmen umgesetzt, liegt damit die Gesamtausbeute für den betrachteten Recyclingprozess für Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw bei ca. 8,0 %.

Quantifizierung des Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute

Durch die erzielte Steigerung der Gesamtausbeute des Recyclingprozesses für NdFeB-Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw von 0 % in der Ausgangssituation auf 8,0 % nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen, können bei einem Aufkommen von ca. 60 t/a mit ca. 28 Gew.-% Neodym, ca. 1 Gew.-% Dysprosium und 1 Gew.-% Praseodym (vgl. Tabelle 120) Zielmetallmengen zurückgewonnen werden, die

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 45.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 1,05 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 100.000 € entsprechen.

4.2.5.4 Gesamtergebnis

In der abschließenden Quantifizierung des Brutto-Systemnutzens durch die erzielte Steigerung der Ausbeute wird die ermittelte Gesamtausbeute für den Abfallstrom *NdFeB-Magnete* zu den ursprünglichen theoretischen Potenzialen an GWP, KEA und Neuwarenwerten im Abfallstrom (vgl. Abschnitt 4.2.5) ins Verhältnis gesetzt. Die zugehörigen spezifischen Ausbeuten der drei Teilmengen können Tabelle 129 entnommen werden.

Die Verrechnung der erzielten Steigerungen der Ausbeuten in den betrachteten Teilmengen *Magnete aus Elektromotoren*, *Magnete aus IT* und *Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw* mit den zugehörigen spezifischen Aufkommen (vgl. Tabelle 120) ergibt eine Steigerung der Gesamtausbeute des Abfallstroms *NdFeB-Magnete* von 0 % in der Ausgangssituation auf 6,8 % nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen in den Teilmengen.

Bei einem Gesamtaufkommen an NdFeB-Magneten von ca. 402 t/a (vgl. Abschnitt 4.2.5) entsprechen damit die zurückgewonnenen Zielmetallmengen

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 258.000 kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 5,85 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 675.000 €.

Auch bei diesem Abfallstrom wird deutlich, dass es aufgrund der sich multiplizierenden Ausbeuten über die Verfahrensschritte der Recyclingkette sehr schwierig sein wird, hohe Rückgewinnungsgrade zu erzielen. Basis der Berechnung sind Annahmen hinsichtlich zu erwartender Ausbeuten durch die Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze in den vier Verfahrensschritten. Auch in diesem Beispiel liegen die Einzelwerte der Ausbeuten im deutlich zweistelligen Bereich (Tabelle 129). Allerdings limitiert für jede Teilmenge einer der beiden ersten Verfahrensschritte die spezifischen Gesamtausbeuten. Bei den Magneten aus Industriemotoren ist es mit 30 % die Erfassung und bei den Magneten aus IT sowie aus Altfahrzeugen ist es mit 20 % bzw. 30 % jeweils die Vorseparation. Unter anderem deshalb wird, gewichtet über die Anteile der Teilmengen am der Gesamtmenge des Abfallstromes, für den gesamte Recyclingprozess ein Rückgewinnungsgrad lediglich in Höhe von 6,8 % ermittelt.

Die angenommenen Ausbeuten der Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze sind eher konservativ abgeschätzt. Um einzuschätzen, welche Auswirkungen sehr optimistische Annahmen hinsichtlich der Steigerung der Ausbeuten durch die gleichen Maßnahmenoptionen/Verbesserungsansätze auf das Gesamtergebnis haben, werden für die drei Teilmengen in einer Vergleichsrechnung folgende Annahmen getroffen

- durch eine optimale Erfassung kann die Ausbeute der Ausgangssituationen auf 50 – 85 % gesteigert werden,
- durch eine optimale Vorseparation in diesem Verfahrensschritt können spezifische Ausbeuten zwischen 70 % und 85 % erreicht werden,
- durch eine optimale Aufbereitung in diesem Verfahrensschritt können spezifische Ausbeuten zwischen 80 % und 85 % erreicht werden und
- durch eine optimale Verwertung in diesem Verfahrensschritt kann eine spezifische Ausbeute in Höhe von 90 % erreicht werden.

Tabelle 129 fasst die für diesen Abfallstrom angenommenen Ausbeuten noch einmal zusammen.

Tabelle 129: Angenommene Ausbeuten im seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom *NdFeB-Magnete*

Verfahrensschritt	Ausgangssituation			Nach Umsetzung der ausgewählten Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze					
	IM	IT	AF	bei konservativ abgeschätzten Ausbeuten			bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeute		
				IM	IT	AF	IM	IT	AF
Erfassung	30 %	50 %	50 %	30 %	65 %	52 %	60 %	70 %	85 %
Vorseparation	0 %	0 %	0 %	50 %	20 %	30 %	70 %	85 %	80 %
Aufbereitung	0 %	0 %	0 %	50 %	60 %	60 %	85 %	80 %	80 %
Verwertung	0 %	0 %	0 %	85 %	85 %	85 %	90 %	90 %	90 %
GESAMT			0 %			6,8 %			42,3 %

IM = Magnete aus Industriemotoren

IT = Magnete aus IT

AF = Magnete aus kleinen E-Motoren aus Pkw

Tabelle 129 zeigt, dass auch bei sehr optimistisch abgeschätzten Ausbeuten in den vier Verfahrensschritten über den gesamten Recyclingprozess nur ein Rückgewinnungsgrad von etwa 42 % erzielt werden kann. Die damit zurückgewonnenen Zielmetallmengen entsprechen

- treibhauswirksamen Emissionen in Höhe von ca. 1,6 Mio. kg CO₂-Äquivalenten,
- einem Verbrauch an fossilen Brennstoffen und regenerativen Energieträgern in Höhe von ca. 36,1 Mio. MJ sowie
- Kosten für den Einkauf von Primärrohstoffen in Höhe von 4,1 Mio. €.

Gegenüber den Ergebnissen bei eher konservativ abgeschätzten Ausbeuten entspricht das jeweils einer Verbesserung um mehr als das 6fache.

Fazit

In der Ausgangssituation für den seltenerdmetallhaltigen Abfallstrom *NdFeB-Magnete* wird davon ausgegangen, dass derzeit die betrachteten Zielmetalle Dysprosium, Neodym und Praseodym während des Recyclingprozesses für Altfahrzeuge vollständig verloren gehen. Durch Umsetzung verschiedener Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze in den Verfahrensschritten des Recyclingprozesses mit eher konservativ abgeschätzten Ausbeutesteigerungen kann ein Rückgewinnungsgrad (Gesamtausbeute) von 6,8 % erzielt werden.

Sehr optimistische Annahmen hinsichtlich der Steigerung der Ausbeuten für die gleichen Maßnahmenoptionen/ Verbesserungsansätze zeigen, dass für den gesamten Recyclingprozesses ein Rückgewinnungsgrad deutlich über 42 % kaum erreichbar sein dürfte.

5 Implementierung der Maßnahmen zur Stärkung des Recyclings von Edel- und Sondermetallen

5.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt werden die zuvor dargestellten Maßnahmenoptionen zusammengefasst und bewertet. Zu detaillierteren Erläuterungen wird auf die Kapitel verwiesen, in denen die jeweiligen Abfallströme analysiert wurden. Sowohl der Maßnahmenkatalog als auch die Bewertungen beruhen auf einer Betrachtung der jeweiligen Gesamt-Abfallströme. Für einzelne Teilströme und Akteurskonstellationen kann es zu abweichenden Bewertungen kommen. So kann es im Einzelfall, z.B. bei direktem Zugriff auf größere Mengen definierter und einheitlicher Abfälle, durchaus zweckmäßig sein, für einen Abfallstrom einen Prozess aufzubauen, der für Mengen aus anderen Konstellationen nicht in Frage kommt. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass künftig neue aussichtsreiche Ansätze entwickelt werden.

In jedem Falle sollte bei der Entscheidung über mögliche Maßnahmen berücksichtigt werden, dass nur ein Teil der in den Markt gebrachten Mengen und somit des Potenzials tatsächlich wieder zu marktfähigen Metallen werden kann. Zum einen fällt nur ein Teil der Menge in Europa als zu entsorgender Abfall an und davon wird nur ein Teil in einer Weise entsorgt, die ein Recycling grundsätzlich ermöglicht. Zum anderen kommt es in der Wertschöpfungskette zu Materialverlusten. Gerade im Falle von Edel- und Sondermetallen kann darum am Ende der Prozesskette meist nur ein Bruchteil des Potenzials tatsächlich zurückgewonnen werden.

Die Maßnahmenoptionen werden in diesem Kapitel anhand folgender Kriterien qualitativ bewertet:

- Steigerung der zurückgewonnenen Menge Zielmetalle
 - Bewertet wird die voraussichtliche Auswirkung einer Maßnahme auf die zurückgewonnene Menge der Zielmetalle (Ausbeute entlang der Erfassungs- und Verwertungskette).
 - Bewertung: keine Steigerung der Ausbeute (--) bis sehr große Steigerung der Ausbeute (++)
- Grad der Verbindlichkeit
 - Gibt an, welches Maß der Verbindlichkeit zur Umsetzung der Maßnahme für die zentralen Akteure besteht.
 - Bewertung: keine oder unwesentliche Verbindlichkeit (--) bis sehr große Verbindlichkeit etwa bei rechtlicher Verpflichtung (++)
- Realisierungschancen
 - Bewertet die Aussichten auf Implementierung der Maßnahme unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Mitwirkungsbereitschaft der erforderlichen Akteure, aber auch weiterer Aspekte, z.B. Kosten.
 - Bewertung: keine oder sehr geringe Realisierungschancen etwa aufgrund voraussichtlich fehlender Mitwirkungsbereitschaft der Akteure oder zu erwartender Widerstände (--) bis sehr gute Realisierungschancen etwa aufgrund voraussichtlich großer Mitwirkungsbereitschaft der Akteure (++)
- Realisierungsaufwand
 - Bewertet den Aufwand zur Umsetzung der Maßnahme sowohl hinsichtlich der Implementierung als auch der tatsächlichen Durchführung.

- Bewertung: sehr großer Aufwand für Implementierung und Durchführung der Maßnahmen (--) bis sehr geringer Aufwand für Implementierung und Durchführung der Maßnahmen (++)
- Effekte auf Verwertung anderer Metalle
 - Gibt an, in welchem Umfang durch Umsetzung der Maßnahme die Ausbeute anderer als der Zielmetalle beeinflusst wird.
 - Bewertung: massive Minderung der Ausbeute anderer Metalle (--) bis sehr große Steigerung der Ausbeute anderer Metalle (++)

5.2 Seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe

Zur Steigerung des Recyclings von seltenerdmetallhaltigen Magnetwerkstoffen, die in Elektro- und Elektronikgeräten bzw. Altfahrzeugen enthalten sind, könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Kennzeichnungspflicht (s. auch Kapitel 2.3.2.5 und 2.4.3.8)

Kennzeichnung von Motoren (oder anderen Anwendungen) z.B. auf dem Typenschild, die Einzelmagnete größer als z.B. 20 g enthalten oder eine Gesamtmenge größer als z.B. 200 g. Der Kennzeichnungs-Code gibt den Magnettyp an (z.B. NdFeB), ggfs. erweitert mit Angabe aller in Anteilen von mehr als 1 Gew.-% enthaltenen Seltenerdmetalle (z.B. NdPrDyFeB). Zu prüfen wäre, ob die Kennzeichnung auch eine Unterscheidung von polymergebundenen und Sintermagneten ermöglichen sollte.

Zu prüfen: Die Möglichkeit der Einführung einer Kennzeichnungspflicht, z. B. über das ElektroG bzw. die WEEE-RL oder über auf die Ökodesign-Richtlinie gestützte europäische Durchführungsmaßnahmen bzw. für Motoren über die Motorenverordnung; soweit zweckmäßig auch die Ausweitung auf weitere Produkte.

Hinweis: Ggfs. Kennzeichnungspflicht für alle Permanentmagnettypen, damit auch der vermehrte Einsatz anderer seltenerdmetallhaltiger Magnettypen erfasst wäre und Ausweichbewegungen durch Wechsel des Magnettyps vermieden würden bzw. nachvollziehbar sind.

Hinweis: Bei automatischer Sortierung könnte die Kennzeichnung sehr einfach gehalten werden (z.B. NdFeB).

- M 2: Ausbau-, Verwertungs- und Informationspflicht (s. auch Kapitel 2.3.3 und 2.4.3.8).

Für Motoren bzw. Geräte mit nicht motorengelassenen Magneten, die als NdFeB-haltig erkennbar (z.B. in Festplatten) oder, wie unter M 1 beschrieben, gekennzeichnet sind, Ausbau- und Informationspflicht, die ausgebauten Magnete einer Verwertung zuzuführen, durch die Seltenerdmetalle aus Primärrohstoffenersetzt werden.

Verankert werden könnten die Verpflichtungen für Elektroaltgeräte in der WEEE-RL (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) und für Altfahrzeuge in der EG-Altfahrzeugrichtlinie (Anhang I Nr. 4) bzw. in der deutschen Altfahrzeugverordnung (Anhang Punkt 3.2.3.3).

Sollten dort Anforderungen für das Ausschleusen von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen festgelegt werden, müssen die Hersteller entsprechende Demontagehinweise zur Verfügung stellen. Zu prüfen: Ausbau bestehender Initiativen zur Etablierung einer zentralen, ggf. internetbasierten Demontagehinweisedatenbank (www.i4r-platform.eu).

Hinweis: Eine Pflicht zum Ausbau ist nur dort zielführend, wo eine Kennzeichnungspflicht besteht oder z. B. aufgrund der Demontagehinweise das Vorhandensein von NdFeB-Magneten

bekannt ist. Gegebenenfalls kann in die genannten Regelwerke eine Formulierung aufgenommen werden wie „... sind auszubauen, aus Geräten, die entsprechend gekennzeichnet sind, oder bei denen das Vorhandensein NdFeB-haltiger Magnete allgemein bekannt ist“.

- M 3: Verpflichtung zum demontagegerechten Design (s. auch 2.4.3.8)
 Zu prüfen: Erscheint eine Vorgabe „Magnete müssen mit einfachen Mitteln unzerstört ausgebaut werden können“ unter Abwägung aller Gesichtspunkte vertretbar (mögliche Zielkonflikte mit Energie- und Materialeffizienz)? Wenn ja: Prüfung der Möglichkeiten zur Verpflichtung der Hersteller bzw. Importeure der sondermetallhaltigen Elektro- und Elektronikgeräte bzw. Fahrzeuge. Wenn eine solche Vorgabe nicht vertretbar ist, dann muss auch die Verpflichtung zum Ausbau eingeschränkt werden, z.B. „Ausbau, sofern technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und unter Beachtung der sozialen Folgen“. Ob der Aufwand vertretbar ist, könnte in technischen Leitlinien anhand von Kriterien oder Bauteillisten beschrieben und regelmäßig aktualisiert werden.
- M 4: Verwertungsquote (s. auch Kapitel 2.3.3.2 und 2.4.3.8)
 Einführung einer speziellen sondermetallbezogenen Verwertungsquote mit Bezug auf die der Verwertung zugeführte Menge: allenfalls mit großem Aufwand zu überwachen, denn hierzu müssten sowohl die separierten und der Verwertung zugeführten Mengen als auch die Ausbeuten der Verwertungsprozesse ermittelt und zusammengeführt werden (vgl. daher die Möglichkeit einer entsprechenden Anpassung der Mitteilungspflichten in ElektroG und AltfahrzeugV)
- M 5: Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern (s. auch Kapitel 3, insbes. 3.3.4)
 Für NdFeB-Magnete oder Teile, die z.B. zu mindestens 10% aus NdFeB-Magneten bestehen; Möglichkeit zur Einrichtung und Unterhaltung privatwirtschaftlich betriebener Langzeitzwischenlager, dazu Änderungen der Anforderungen an die Langzeitlagerung in § 23 DepV.
- M 6: Bündelungswshops (s. auch Kapitel 2.4.2.4 und 2.4.3.9)
 Unter Einbeziehung von Demontagebetrieben, Aufbereitern und für Demontagebetriebe (auch in anderen Feldern) tätigen Logistikern und Verwertern, siehe auch Abbildung 7 in Kapitel 2.4.2.4.
- M 7: Förderung der Entwicklung von Transport- und Behältersystemen für NdFeB-Magnetabfälle (s. auch Kapitel 2.4.3.9)
 Ausschreibung eines Forschungsprojekts unter Beteiligung von Praxispartnern; Schritt 1: Prüfung der Eignung von Systemen, die zur Bereitstellung von Neu-Magneten eingesetzt werden
- M 8: Initiierung Erfassungs- und Demontagenetzwerk für Elektrofahrräder (s. auch Kapitel 2.4.3.9)
 Anstoßen einer freiwilligen Kooperation zwischen Fahrrad-Herstellern, -Händlern und – Verwertern z.B. durch einen Workshop

Tabelle 130 zeigt eine vergleichende Bewertung dieser Maßnahmen.

Tabelle 130: Bewertung der Maßnahmen für seltenerdmetallhaltige Magnetwerkstoffe

Maßnahmenoption	A Steigerung der zurück- gewonne- nen Menge Zielmetalle	B Grad der Verbind- lichkeit	C Realisie- rungschan- cen	D Realisie- rungsauf- wand	E Effekte auf Verwertung anderer Metalle
M 1: Kennzeichnungspflicht	+	++	+	-	+/-
M 2: Ausbau- und Verwer- tungspflicht i.V. mit M 1	++	++	+/-	-	+/-
M 3: Verpflichtung zum ver- wertungsgerechten Design	+	++	-	--	+/-
M 4: Verwertungsquote	+	++	-	--	+/-
M 5: Schaffung der Möglich- keit zur Einrichtung von Lang- zeitzwischenlagern	+/-	-	+/-	+/-	+/-
M 6: Bündelungsworkshops	+/-	--	+	++	+
M 7: Förderung der Entwick- lung von Transport- und Be- hältersystemen	+/-	--	+	+	+/-
M 8: Initiierung Erfassungs- und Demontagenetzwerk für Elektrofahrräder	+	+/-	+	+	+

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht:

Die Maßnahmen M 1, 2, 3 und 4 würden über das bislang in der WEEE-RL bzw. der Altfahrzeug-Richtlinie festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher ist eine Anpassung der europäischen Regelwerke erforderlich und/oder eine Verschärfung der deutschen Vorschriften. Eine überschießende deutsche Umsetzung wäre aufgrund der Ziele der WEEE-Richtlinie und der Altfahrzeug-Richtlinie RL, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grundsätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Zusätzliche Mitteilungspflichten im Rahmen von M 4 müssten ferner im Einklang mit Durchführungsrechtsakten der Kommission zur Festlegung eines einheitlichen Formats der Registrierung und der Häufigkeit der Berichterstattung nach Art. 16 Abs. 3 WEEE-RL stehen.

Im Rahmen von M 5 wäre ferner zu beachten, dass die WEEE-RL eine Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Die Zwischenlagerung der sondermetallhaltigen Bauteile stellt auch kein Recycling im Sinne der Altfahrzeug-Richtlinie dar. Daher wäre ein Tätigwerden des europäischen Gesetzgebers erforderlich, wenn die Verwertungs- bzw. Recyclingdefinition auch die Zwischenlagerung umfassen soll.

Die Regelung der Maßnahmen nach M 1 und M3 sowie die Demontagehinweise nach M2 wären auf europäischer Ebene auch in Durchführungsmaßnahmen nach der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG denkbar.

Fazit: Als wirksame Maßnahmen mit hoher Verbindlichkeit stellen sich M2 in Kombination mit M1 dar, die durch M3 und/oder M4 zusätzlich gestärkt werden könnten. Insbesondere der Realisierungsaufwand für M3 und M4 ist jedoch recht hoch. Maßnahmen mit insgesamt günstigen Bewertungen, die mit geringem Aufwand zu realisieren wären, sind M6 und M8. Beide Maßnahmen haben zudem positive Effekte auf die Verwertung anderer Metalle. Der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch deutlich geringer. Zur Angemessenheit von Maßnahmen s. Erläuterungen s. Kapitel 5.10.

5.3 Edelmetallhaltige Leiterplatten und Lambdasonden aus Altfahrzeugen

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Edelmetallen aus Fahrzeugelektronik könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Designvorgaben an die Fahrzeugindustrie (s. auch Kapitel 2.4.4.7 und 2.3.5)

Verpflichtung zum demontagegerechten Einbau (s. z.B. VDI Richtlinie 2243: recyclingorientierte Produktentwicklung) größerer Elektronikkomponenten in Fahrzeuge; Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie und in der AltfahrzeugV, ggfs. in Form zusätzlicher bzw. ergänzter Anhänge; nur zielführend in Kombination mit einer Ausbaupflichtung für Altfahrzeug-Demontagebetriebe

Eingrenzung auf relevante Komponenten, um unangemessenen Aufwand zu vermeiden; als erste Grundlage einer Auswahl-Orientierung könnte die Separationsempfehlung von Groke et al. (Groke et al. 2017) dienen.

Zu prüfen: Zuvor sollte geprüft werden, in welchem Umfang Konflikte mit den Designzielen Gewichtsreduzierung und Materialeffizienz auftreten können.
- M 2: Ausbau-, Verwertungs- und Informationspflicht (s. auch Kapitel 2.4.4.7 und 2.3.3)

Verpflichtung zum Ausbau größerer Fahrzeugelektronik-Komponenten aus Altfahrzeugen und zur Zufuhr zu einem Verwertungsprozess, bei dem Leiterplatten abgetrennt und der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden; Verankerung in der Altfahrzeugrichtlinie, Anhang I (Technische Mindestanforderungen für die Behandlung) Nr. 4 (Behandlung zur Verbesserung des Recycling) bzw. in der AltfahrzeugV, Anhang (Anforderungen an die Annahme und Rücknahme von Altfahrzeugen, an die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Altfahrzeugen und Restkarossen sowie an die ordnungsgemäße und schadlose Entsorgung der dabei anfallenden Abfälle)

Soweit neue Anforderungen an die Ausschleusung von edel- und sondermetallhaltigen Bauteilen aus Altfahrzeugen im Rahmen der Demontage gesetzlich festgelegt werden sollten, würde dies auch bedeuten, dass die Hersteller den Demontagebetrieben entsprechend ergänzte Demontagehinweise zur Verfügung stellen müssen, aus denen sich ergibt, wie diese edel- und sondermetallhaltigen Bauteile ausgebaut werden können.
- M 3: Altfahrzeugrücklauf verbessern (s. auch Kapitel 2.4.4.8)

Steigert das Potenzial zur Rückgewinnung von Edelmetallen sowohl im Falle der Demontage edelmetallhaltiger Teile als auch – mit deutlich schlechteren Ausbeuten - beim Schreddern noch in den Altfahrzeugen enthaltener, nicht demontierter Bauteile.
- M 4: Postschredderoptimierung (s. auch Kapitel 2.4.4.8)

Förderung von Projekten zur Verbesserung der Edelmetallausbeute (wie auch der Ausbeute weiterer Metalle wie z.B. Stahl, Kupfer und Aluminium) aus Schredderfraktionen im Falle nicht demontierter edelmetallhaltiger Bauteile; z.B. durch Ausschreibung eines Forschungsprojekts unter Beteiligung von Praxispartnern

- M 5: Bündelungs-Workshops (s. auch Kapitel 2.4.2.4 und 2.4.4.8)

Im Rahmen von Bündelungsworkshops werden Möglichkeiten erarbeitet, bestehende Netzwerke zu nutzen und auszubauen. Sinnvoll könnte das Zusammenbringen von Demontagebetrieben (und ggf. weiteren Betrieben mit ähnlichen Abfällen aus anderen Branchen) mit deren potenziellen Abnehmern und Logistikern zur Erweiterung bestehender oder zur Entwicklung neuer Netzwerke sein. Ziel ist es, dass entsprechende Vereinbarungen getroffen werden, um bereits etablierte Abholbeziehungen zu nutzen und neue Verbindungen aufzubauen.

- Übergeordnete Maßnahmen (s. auch Kapitel 2.4.2 und 5.9)

Des Weiteren können übergeordnete Maßnahmenoptionen für Altfahrzeug-Demontagebetriebe die Effizienz der betriebsinternen und der betriebsübergreifenden Logistik steigern, insbesondere die Entwicklung und Einführung eines Recycling-Warenwirtschaftssystem (RWWS), eventuell unterstützt durch ein Füllstanderfassungssystem, sowie die Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“, siehe Kapitel 5.9.

Tabelle 131 zeigt eine vergleichende Bewertung dieser Maßnahmen.

Tabelle 131: Bewertung der Maßnahmen für edelmetallhaltige Leiterplatten und Lambdasonden aus Altfahrzeugen

Maßnahmenoption	A Steigerung der zurück- gewonnen- nen Menge Zielmetalle	B Grad der Verbind- lichkeit	C Realisie- rungschan- cen	D Realisie- rungsauf- wand	E Effekte auf Verwertung anderer Metalle
M 1: Designvorgaben an die Fahrzeugindustrie	+	++	--	--	+
M 2: Ausbau- und Verwertungspflicht	++	++	+/-	--	+
M 3: Altfahrzeugrücklauf verbessern	++	++	--	-	++
M 4: Schredderoptimierung	+	+/-	+	++	+
M 5: Bündelungs-Workshops	+	--	+	+	+

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Die Maßnahmen M 1 und 2 würden über das bislang in der Altfahrzeug-Richtlinie festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher wäre eine Anpassung der europäischen Regelwerke erforderlich und/oder eine Verschärfung der deutschen Vorschriften. Eine solche überschießende Umsetzung wäre aufgrund der Ziele der Altfahrzeug-Richtlinie RL, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grundsätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Fazit: Die einzige wirksame Maßnahme mit hoher Verbindlichkeit bei insgesamt günstiger Bewertung ist M2. Hier ist der Realisierungsaufwand jedoch recht hoch. Die Maßnahmen M3, M4 und M5 weisen insgesamt günstige Bewertungen auf. Auch diese Maßnahmen haben positive Effekte auf die Verwertung anderer Metalle, der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch eher gering. Zur Angemessenheit von Maßnahmen s. Kapitel 5.10.

5.4 Edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Edelmetallen aus Umweltkatalysatoren könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Round-Table-Gespräch mit Katalysatorherstellern und Katalysatoranwendern (s. auch Kapitel 2.4.5.4)

Diskussion von Möglichkeiten einer besseren Information der Anwender (z.B. über QR-Code) und eines Ausbaus der Rücknahmemöglichkeiten.

- M 2: Einführung einer gesetzlichen Pflicht zur getrennten Sammlung

Z. B. im Rahmen einer gesetzlichen Regelung zur abfallrechtlich erweiterten Produktverantwortung der Hersteller und Vertreiber von Umweltkatalysatoren (inklusive Getrennthaltungs- und Rücknahmepflichten), oder, soweit die Umweltkatalysatoren als gewerbliche Abfälle anfallen: Erweiterung der Gewerbeabfallverordnung mit Getrennthaltungspflichten der Endnutzer der Umweltkatalysatoren. (s. auch 2.4.5.4).

Tabelle 132 zeigt eine vergleichende Bewertung dieser Maßnahmen.

Tabelle 132: Bewertung der Maßnahmen für edelmetallhaltige Umweltkatalysatoren

Maßnahmenoption	A Steigerung der zurück- gewonnen- nen Menge Zielmetalle	B Grad der Verbind- lichkeit	C Realisie- rungschan- cen	D Realisie- rungsauf- wand	E Effekte auf Verwertung anderer Metalle
M 1: Round-Table-Gespräch mit Katalysatorherstellern und Vertretern von Katalysatoranwendern	+	+/-	+	++	+/-
M 2: Verpflichtung zur getrennten Sammlung	++	++	+	-	+

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Bei der Umsetzung der Maßnahmen nach M 2 in einer neuen Rechtsverordnung auf Grundlage des KrWG oder in der Gewerbeabfallverordnung wären die Vorgaben der Abfallrahmen-RL zu beachten, insbesondere zur Abfallhierarchie des Art. 4 Abfallrahmen-RL und zur erweiterten Produktverantwortung in Art. 8 f. Abfallrahmen-RL. Bei Beachtung dieser Grenzen wären keine Änderungen des europäischen Rechts erforderlich.

Fazit: M2 weist eine gute Wirksamkeit bei hoher Verbindlichkeit und insgesamt positiver Bewertung auf. M1 hat eine geringere Wirksamkeit und Verbindlichkeit, weist jedoch aufgrund des geringen Realisierungsaufwands eine insgesamt ebenfalls positive Bewertung auf. Belastbare Zahlen zum Edelmetallgehalt dieses Abfallstroms liegen nicht vor. Zur Angemessenheit von Maßnahmen s. Kapitel 5.10.

5.5 Cer- und lanthanhaltige Abfallströme

Die meisten betrachteten Abfallströme kommen für die Rückgewinnung von Cer und Lanthan nicht in Frage, weil ihre Konzentrationen und Einzelmengen zu gering sind. Auch dort, wo Mengen bereits gebündelt vorliegen (NiMH-Batterien, Schlacken aus der Aufbereitung von Autokatalysatoren) ist der ökologische und ökonomische Wert bzw. die Wertdichte der enthaltenen Metalle zu gering (siehe Kapitel 2.4.6.1, 2.4.6.3, 2.4.6.4), um aufwendigere Aktivitäten zur Rückgewinnung zu rechtfertigen. So liegt der Neuwert von Cer und Lanthan mit 4,5 €/kg um das Zehn- bis Hundertfache unter dem

der übrigen Seltenerdmetalle (s. Tabelle 116). Zwar liegt das GWP von Lanthan in ähnlicher Größenordnung wie der von Neodym und einigen anderen Seltenerdmetallen, das GWP von Cer liegt allerdings nur bei einem Drittel dessen von Lanthan.

Hinzu kommt, dass Cer und Lanthan bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen aus Erzen als eher geringwertige Nebenprodukte anfallen. Der Umfang der Bergbauaktivitäten wird vom Bedarf an hochwertigeren und in den Erzen geringer konzentrierten Metallen bestimmt. Dies führt dazu, dass Cer und Lanthan zu sehr viel niedrigeren und stabileren Preisen verfügbar sind als die übrigen Seltenerdmetalle. Versorgungsengpässe sind hier kaum zu erwarten. (s. z. B. Kennedy 2016). Ein Recycling dieser Metalle ist damit nicht zweckmäßig, solange dafür aufwendige Verwertungsverfahren erforderlich sind.

In Poliermitteln tritt Cer in recht hohen Konzentrationen auf. Eine Rückgewinnung der Metalle oder Metalloxide ist auch hier nicht sinnvoll. Ein direkter Einsatz von Poliermitteln in Keramikglasuren oder Gießereien könnte jedoch bei geeigneter Qualitätssicherung mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich sein und würde dort Cer bzw. Lanthan aus dem Bergbau ersetzen.

Zur Steigerung des Recyclings von cer- und lanthanhaltigen Abfallströmen aus Poliermitteln könnte folgende Maßnahme zweckmäßig sein:

- M 1: Initiierung eines Workshops (s. auch Kapitel 2.4.6.5)
Zusammenführen möglicher Beteiligter der Prozessketten zum Einsatz von Polierschlämmen in Keramikglasuren oder Gießereien.

Tabelle 133 zeigt eine Bewertung dieser Maßnahme.

Tabelle 133: Bewertung der Maßnahmen für cer- und lanthanhaltige Abfallströme

Maßnahmenoption	A Steigerung der zurückgewonnenen Menge Zielmetalle	B Grad der Verbindlichkeit	C Realisierungschancen	D Realisierungsaufwand	E Effekte auf Verwertung anderer Metalle
M 1: Initiierung eines Workshops	+	+/-	+	++	+/-

Fazit: Die einzige Maßnahmenoption weist bei geringem Realisierungsaufwand eine insgesamt positive Bewertung auf. Zur Angemessenheit von Maßnahmen s. Kapitel 5.10.

5.6 Seltenerdmetallhaltige Leuchtstoffe

Zur Aufbereitung mindestens eines Teils der Leuchtstoffe zu Seltenerdmetallkonzentraten stehen Verfahren zur Verfügung, die aber derzeit aus Kostengründen nicht betrieben werden. Sollten die Prozesse wieder in Betrieb genommen werden, könnten die bereits separiert vorliegenden Mengen aus den bestehenden Aufbereitungsprozessen für Lampen und Geräte diesen Anlagen zugeführt werden.

Darüber hinausgehende Maßnahmen sind aufgrund der geringen und zudem abnehmenden Menge nicht zweckmäßig.

Zu diesen Abfallströmen werden keine Maßnahmenoptionen benannt.

5.7 Separierte indiumhaltige LCD-Schichten

Zur Steigerung der Rückgewinnung von Indium aus separierten LCD-Schichten könnten folgende Maßnahmen zweckmäßig sein:

- M 1: Forschungsprojekt Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen (s. auch Kapitel 2.4.8.5)
 Initiierung eines Förderprojektes zur Umsetzung der Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen aus der Aufbereitung von LCD-Anzeigen in den Pilotmaßstab mit Erarbeitung fundierter Stoffstrom- und Wirtschaftlichkeitsbilanzen für den Produktionsmaßstab
- M 2: Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern (s. auch Kapitel 3, insbes. 3.3.6)
 Für separierte indiumhaltige LCD-Schichten; Möglichkeit zur Einrichtung und Unterhaltung privatwirtschaftlich betriebener Langzeitzwischenlager, dazu Änderung der Anforderungen an die Langzeitlagerung in § 23 DepV.
- M 3: Verpflichtung zur separaten Sammlung und Verwertung indiumhaltiger Glasfraktionen
 Verpflichtung der Erstbehandler, die indiumhaltige Glasfraktion aus der Aufbereitung von LCD-Displays separat zu sammeln und einem Verfahren zur Indium-Rückgewinnung zuzuführen; Verankerung könnte in der WEEE-Richtlinie (Anhang VII) bzw. im deutschen ElektroG (Anlage 4) erfolgen

Tabelle 134 zeigt eine vergleichende Bewertung dieser Maßnahmen.

Tabelle 134: Bewertung der Maßnahmen für separierte indiumhaltige LCD-Schichten

Maßnahmenoption	A Steigerung der zurück- gewonnen- nen Menge Zielmetalle	B Grad der Verbind- lichkeit	C Realisie- rungschan- cen	D Realisie- rungsauf- wand	E Effekte auf Verwertung anderer Metalle
M 1: Förderprojekt Aufbereitung indiumhaltiger Glasfraktionen	+/-	+/-	++	+	+/-
M 2: Schaffung der Möglichkeit zur Einrichtung von Langzeitzwischenlagern	+	-	+/-	+/-	+/-
M 3: Verpflichtung zur separaten Sammlung und Verwertung indiumhaltiger Glasfraktionen	++	++	+/-	+	+/-

Vereinbarkeit mit dem EU-Recht: Die Maßnahme M 3 würde über das bislang in der WEEE-RL festgelegte Pflichtenprogramm hinausgehen. Daher wäre entweder eine Anpassung der WEEE-RL erforderlich und/oder eine Änderung des ElektroG. Eine solche überschießende deutsche Umsetzung im ElektroG wäre aufgrund der Ziele der WEEE-Richtlinie, des in Art. 114 Abs. 3 und 191 Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union („AEUV“) vorgesehenen hohen Schutzniveaus im Bereich der Umwelt und der Schutzverstärkungsklausel des Art. 193 AEUV grundsätzlich zulässig. Es müsste jedoch sichergestellt sein, dass diese gesetzgeberischen Maßnahmen nicht das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts beeinträchtigen oder Wettbewerbsverzerrungen hervorrufen.

Im Rahmen von M 2 wäre ferner zu beachten, dass die WEEE-RL eine Zwischenlagerung ausdrücklich nicht als Verwertung anerkennt. Daher wäre ein Tätigwerden des europäischen Gesetzgebers erforderlich, wenn die Verwertungsdefinition auch die Zwischenlagerung umfassen soll.

Fazit: Die einzige wirksame Maßnahme mit hoher Wirksamkeit und Verbindlichkeit ist M 3. Diese Maßnahme hat eine insgesamt positive Bewertung. M1 hat ebenfalls eine insgesamt günstige Bewertung. Der Grad der Verbindlichkeit ist hier jedoch eher gering. Zur Angemessenheit von Maßnahmen s. Kapitel 5.10.

5.8 Separierte Tantalkondensatoren

Grundsätzlich wäre eine Bündelung über Einbindung sämtlicher Erstbehandler möglich. Hierzu müssten diese aber hochwertige Leiterplatten aus der Hand geben, die sie schon heute gewinnbringend verkaufen. Der Anteil des Tantals am Gesamtwert ist dabei recht klein, bietet hierzu also kaum hinreichende Motivation. Zudem wäre ein nicht unerheblicher Sortieraufwand zur Separation von Leiterplatten mit relevanten Tantalgehalten erforderlich, der von möglichen Abnehmern der Leiterplatten kaum angemessen vergütet werden könnte.

Eine Sortierung der Leiterplatten sollte daher von Unternehmen durchgeführt werden, die ggfs. selbst Anlagen zur Separation der Tantalkondensatoren betreiben (vgl. bifa 2018). Solche Anlagen können Aussichten auf relativ einfach zugängliche große Mengen tantalreicher Leiterplatten bieten und können, wenn sie einmal in Betrieb sind, weitere Mengen aus mit Blick auf die Zielmetalle interessanten Marktsegmenten anziehen.

Zu diesem Abfallstrom werden keine Maßnahmen benannt.

5.9 Übergeordnete Maßnahmen zur Logistik und Bündelung

Über die zuvor für einzelne Abfallströme dargestellten spezifischen Maßnahmooptionen hinaus bestehen weitere übergeordnete Handlungsmöglichkeiten zur Effizienzsteigerung der betriebsinternen und der betriebsübergreifenden Logistik, die auf die Abfall- bzw. Stoffstrombewirtschaftung in den Betrieben insgesamt, nicht nur speziell auf die edel- und sondermetallhaltigen Abfallströme abzielen, aber dennoch positive Auswirkungen auf die Rückgewinnung der Zielmetalle aus den Abfällen haben können. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die im Bereich der Demontage und Verwertung angesiedelt sind:

- die Förderung der Entwicklung eines Recycling-Warenwirtschaftssystems (RWWS), betriebsintern und/oder betriebsübergreifend (s. auch Kapitel 2.4.2.1).

Etablierung einer Datenbasis, Datenanalyse und ggf. Akteursvernetzung zur besseren Steuerung der Wertstoffströme; Entwicklung einer Software, mit der eingehende entsorgte Objekte sowie erzeugte Wertstofffraktionen qualitativ und quantitativ informativ erfasst werden. Es sollte auch die Möglichkeit geben, Herstellerinformationen zur Zusammensetzung von Objekten mit den angenommenen Objekten zu verknüpfen; dabei sollten auch nicht herstelleregebundene Quellen für solche Informationen (freie Plattformen) zugänglich gemacht werden. Weitere Anforderungen sind aus der Praxis heraus in einer Anforderungsanalyse zu erarbeiten. Ziel: Effizienzsteigerung der betriebsinternen und betriebsübergreifenden Logistikprozesse durch Digitalisierung der Recycling-Kette/Digitalisierung von Sammelstellen, verbesserte Datenbasis und -analyse für eine kettenübergreifende Prozesssteuerung, Bereitstellung von Vergangenheitsdaten für zukünftige Prognosen und Erstellung einer Datenbasis für neue zukünftige Geschäftsmodelle.

- die Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“ (s. auch Kapitel 2.2.4, Abschnitt „Sortierung und Demontage“)

Ausarbeitung einer Handreichung „Lean Management“ zur Übertragung von Lean Management Ansätzen auf Demontageprozesse in der Recycling-Wirtschaft; insbesondere für KMU; kann durch Steigerung von Effizienz und Effektivität dazu beitragen, dass bisher unwirtschaftliche Demontageprozesse wirtschaftlicher werden.

- die Entwicklung und Verbreitung von Füllstandserfassungssystemen, beispielsweise zur Unterstützung eines RWWS (s. auch Kapitel 2.4.2.2)

Hilft bei der Optimierung von Transportnetzen sowie bei Gestaltung und Auslastung der Touren durch die sie betreibenden Dienstleister. Die Füllstandserfassung kann ein RWWS unterstützen.

- Die stoffstromübergreifende Bündelung (s. auch Kapitel 2.4.2.3 und Abbildung 7)

Sie zielt auf eine bessere Auslastung der logistischen Ketten bei Transporten. Wird ein Umschlagpunkt zwischengeschaltet, ist die Bündelung weitgehend unabhängig von den Inhaltstoffen der transportierten Objekte. Die Bündelungspotenziale ergeben sich über die räumliche Nähe der Abholadressen bzw. nach dem Umschlagpunkt der Zieldestinationen. Dies lässt sich beispielsweise durch Bündelungsworkshops (2.4.2.4) unterstützen.

Daneben gibt es Maßnahmenoptionen, die auf einer höheren Ebene angreifen und selbstregulierende, von dynamischen technischen und ökonomischen Änderungen weitgehend unabhängige Wirkungen entfalten können:

- Steigerung von Rücklaufmengen durch Stärkung des Vollzugs

Diese Maßnahme wirkt sich unabhängig von Technologien und möglichen Materialsubstitutionen generell positiv auf die Verwertung der in den Altprodukten enthaltenen Metalle aus.

- Steuerliche Bevorzugung von Recyclingprozessen

Schafft unabhängig von Technologien und möglichen Materialsubstitutionen zusätzliche Anreize für die Stärkung von Recyclingkreisläufen und kann Verwertungsprozesse, die in der Nähe der Wirtschaftlichkeitsschwelle liegen, profitabel machen. Dies dürfte jedoch beihilferechtlich problematisch sein und kann vermutlich nur auf europäischer Ebene initiiert werden.

- Steuervorteile für Rezyklateinsatz

Schafft unabhängig von Technologien und möglichen Materialsubstitutionen zusätzliche Nachfrage nach Recyclingmaterialien und kann Verwertungsprozesse, die in der Nähe der Wirtschaftlichkeitsschwelle liegen, profitabel machen. Dies dürfte jedoch beihilferechtlich problematisch sein und kann vermutlich nur auf europäischer Ebene initiiert werden.

- Materialsteuer oder CO₂-Steuer auf Materialien aus Primärrohstoffen in Relation zu ihrem Carbon Footprint

Steigert unabhängig von Technologien und möglichen Materialsubstitutionen die Konkurrenzfähigkeit von Sekundärrohstoffen.

Die Analyse und Bewertung dieser Maßnahmen ist nicht Gegenstand dieser Studie.

5.10 Angemessenheit von Maßnahmen

Der Aufwand für die Realisierung und Umsetzung von Maßnahmen zur Stärkung des Recyclings sollte in angemessenem Verhältnis zum erwarteten ökologischen Nutzen stehen. Tabelle 135 gibt anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen eine Übersicht über den maximal zu erwartenden ökologischen Nutzen einer verbesserten Rückgewinnung der Zielmetalle durch die Vermeidung der entsprechenden Primärproduktion der Metalle.

Tabelle 135: Mengenpotenziale der Zielmetalle in den analysierten Abfallströmen in Deutschland im Jahr 2020 und Treibhausgasemissionen ihrer Herstellung aus mineralischen Rohstoffen sowie Tendenz der künftigen Entwicklung der Potenziale); spezifische Treibhausgasemissionen Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).

Abfallstrom	Indium (LCD) ²⁾	Cer/Lanthan (Poliermittel) ²⁾	Seltenerdmetalle (Leuchtstoffe) ²⁾	Seltenerdmetalle (NdFeB-Magnete) ²⁾	Edelmetalle (Kfz-Elektronik) ¹⁾
Abfallstrom 2020, Deutschland (t)	138	400	149	471	1.000
Potenzial Zielmetalle im Abfallstrom (t)	6	93	24	141	0,86
Potenzial Zielmetalle im Abfallstrom: Treibhausgasemissionen der Primärproduktion (t CO ₂ eq)	1.349	612	470	4.237	3.834
Tendenz Potenzial	steigend	konstant	fallend	steigend	konstant

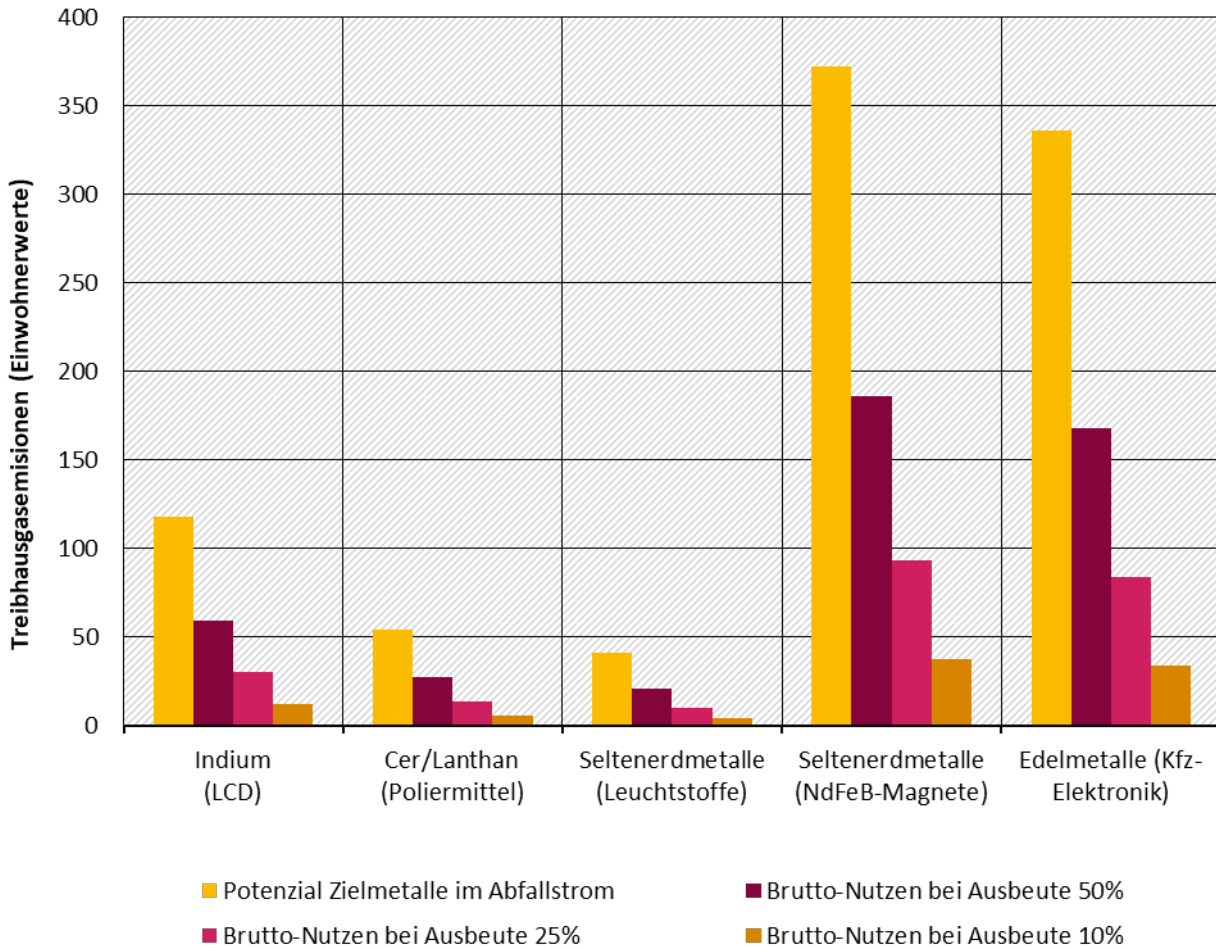
1) Annahme. ca. 500.000 in Deutschland pro Jahr verwertete Altfahrzeuge entsprechen 50% des Potenzials; je Fahrzeug 1 kg Leiterplatten, angenommener Neuwarenwert 9,54 €/kg Leiterplatte; nur Gold (0,016 Gew.-%), Silber (0,061 Gew.-%), Palladium (<0,01 Gew.-%) und Platin (<0,001 Gew.-%),

2) S. Tabelle 67

Die Edelmetallgehalte in Umweltkatalysatoren weisen eine große Spannweite auf. Belastbare Daten zu typischen oder durchschnittlichen Werten liegen nicht vor. Eine Einschätzung des Potenzials ist daher für diesen Abfallstrom nicht möglich.

Abbildung 41 zeigt das Umweltentlastungspotenzial der Zielmetalle, das sich durch die Vermeidung der Primärproduktion ergibt, in den übrigen betrachteten Abfallströmen anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen in Einwohnerwerten. Zusätzlich ist dargestellt, wie groß das Brutto-Potenzial bei unterschiedlichen Ausbeuten der Zielmetalle über die gesamte Prozesskette ist.

Abbildung 41: Brutto-Umweltentlastungspotenzial der Zielmetalle in den betrachteten Abfallströmen durch Verzicht auf ihre Primärproduktion; dargestellt anhand des Leitparameters Treibhausgasemissionen (Angaben in Einwohnerwerten); Carbon Footprint Einwohnerwerte Deutschland: 11,4 t CO₂eq/a (Quelle: Umweltbundesamt 2018); Carbon Footprint Zielmetalle: Dy, Tb: PLoS (2014); alle anderen: ecoinvent (2017).



Der mögliche ökologische Nutzen von Maßnahmen zur Verbesserung des Recyclings beschränkt sich dabei auf den Anteil der aus diesem Potenzial tatsächlich zurückgewonnenen Metalle. Aufgrund unvollständiger Erfassung und von Verlusten entlang der Prozesskette kann die tatsächlich zu erwartende Ausbeute recht gering sein. Beispielfhaft sind in Abbildung 41 die Werte für Ausbeuten von 10, 25 und 50% angegeben.

Von diesem Brutto-Nutzen sind dann noch die Treibhausgasemissionen abzuziehen, die durch die Recyclingprozesse verursacht werden.

Selbst im Falle von NdFeB-Magneten und bei künftig erheblich steigenden Mengen wird zwar das Potenzial voraussichtlich auf bis zu wenige tausend Einwohnerwerte steigen. Der praktisch zu erwartende Nutzen mit Blick auf die Treibhausgasemissionen dürfte durch Exporte in Form von Gebrauchtgeräten, Verluste entlang der Verwertungskette und Treibhausgasemissionen aus der Verwertung allerdings dennoch in Deutschland auch in einigen Jahren einige Hundert Einwohnerwerte kaum übersteigen. Mindestens aus Sicht des Klimaschutzes erscheinen daher in Implementierung und Umsetzung aufwendige, gesetzgeberische Maßnahmen kaum angemessen.

Für die Frage nach der Angemessenheit von (rechtlichen) Maßnahmen zur Stärkung der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen sind neben dem Klimaschutz weitere Aspekte relevant, beispielsweise:

- Weitere Umweltbelastungen der Primärgewinnung der Metalle, hierzu gehören u.a. mögliche Emissionen radioaktiver Strahlung bei der Gewinnung von Seltenerdmetallen oder mögliche Quecksilberemissionen aus dem Kleinbergbau von Gold.
- Die Versorgungssicherheit insbesondere mit kritischen Rohstoffen. Der Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017 (Europäische Kommission 2017) gehören unter anderem die im Projekt betrachteten Edel- und Sondermetalle Indium, Tantal, Platingruppenmetalle sowie Leichte Seltene Erden und Schwere Seltene Erden an. Im Kreislaufwirtschaftspaket (Europäische Kommission 2015, Seite 19) legt die EU-Kommission den Mitgliedstaaten nahe, das Recycling von kritischen Rohstoffen zu fördern. Das zunehmende Augenmerk der europäischen Abfallbewirtschaftung auf die kritischen Rohstoffe wird auch dadurch deutlich, dass sie seit Mai 2018 explizit in der Abfallrahmenrichtlinie adressiert werden, unter anderem um die Abhängigkeit der Union von Ressourceneinfuhren zu verringern (Europäische Union 2018).
- Die Rohstoffsicherung insbesondere für zukünftig immer relevanter werdende Klimaschutz-Technologien wie Photovoltaikanlagen, Windenergieanlagen, Elektromobilität.

Darüber hinaus ist mit mittel- oder langfristig steigenden Mengen vieler der untersuchten Edel- und Sondermetalle in den Abfallströmen zu rechnen.

Auch bei der Bewertung dieser Aspekte sind jedoch die bei den meisten betrachteten Abfallströmen zu erwartenden erheblichen Verluste entlang der Verwertungskette zu berücksichtigen.

Dennoch sind weitere Aktivitäten zur Verbesserung bzw. Realisierung der Rückgewinnung der Zielmetalle aus den betrachteten Abfallströmen durchaus sinnvoll und wünschenswert. So kann in bestimmten Konstellationen, etwa bei direktem Zugriff eines Geräteherstellers oder eines Verwerters auf geeignete definierte Abfallmengen eine Separation von Zielmetallen ökologisch und möglicherweise auch wirtschaftlich vorteilhaft sein - sofern in genau diesen Konstellationen Abnehmer für das gewonnene Material zur Verfügung stehen. Auch können ausgeprägte Preisspitzen bei hohem Bedarf gute Voraussetzungen zum Aufbau begrenzter Rückgewinnungsaktivitäten sein, weil vorübergehend Abnehmer auf internationalen Märkten auftreten, die möglicherweise auch länger gebunden werden können. Und schließlich gelingt es einzelnen Akteuren immer wieder, kreative Lösungen für Teilmengen von Abfallströmen zu entwickeln. Auch ist in einigen der genannten Felder nicht auszuschließen, dass einzelne Akteure eigeninitiativ umfassendere Lösungen aufbauen, und sei es, um auf diesem Wege andere, wirtschaftlich aussichtsreichere Aktivitäten zu stützen. Was hier aus welchen Motiven und in welcher Weise realisiert wird – oder auch nicht realisiert wird – ist kaum vorhersehbar. Zur diesbezüglichen Motivlagen der zentralen Akteure in den Themenfeldern NdFeB-Magnete (s. Kapitel 2.4.3) und Fahrzeugelektronik (s. Kapitel 2.4.4) wurden bereits zuvor Einschätzungen gegeben. In diesem Zusammenhang sei auch noch einmal auf die Bedeutung von Informationen für die Beteiligten hingewiesen. Einschätzungen der Akteure hierzu sowie Szenarien für mögliche marktgetriebene Bündelungsansätze sind in den Kapiteln 2.4.3.5 bzw. 2.4.4.4 dargestellt.

Gezielte und begrenzte staatliche Aktivitäten können dabei hilfreich sein, wenn sie die Eigeninitiative der Beteiligten unterstützen. So können Akteure zusammengebracht werden – etwa in Form von Bündelungsworkshops oder Round-Table-Gesprächen. Dies kann für die Teilnehmer insbesondere dann interessant sein, wenn grundsätzliche Verbesserungen angestrebt sind, bei denen eine mögliche Rückgewinnung der hier betrachteten Metalle nur einer von vielen denkbaren positiven Effekten ist. Dies ist etwa der Fall bei der Entwicklung von Recycling-Warenwirtschaftssystemen oder bei der Entwicklung von Lean-Management-Handreichungen speziell für kleine und mittlere Unternehmen.

Gesetzgeberische Maßnahmen, die auf einer übergeordneten Ebene angreifen, können die Voraussetzungen für Eigeninitiative der Akteure verbessern. So führen Maßnahmen zur Verbesserung der vorschriftsmäßigen Erfassung von Altprodukten wie Altfahrzeuge oder Elektroaltgeräte zu größeren für interessierte Akteure greifbaren Mengen an Edel- oder Sondermetallen, insbesondere aber zu größe-

ren Mengen an Massenmetallen. Die Vereinfachung der Möglichkeit zur Langzeitzwischenlagerung geeigneter separierter Komponenten oder Materialien durch Verwerter trägt ebenfalls zur Ausweitung ihres Handlungsspielraums bei. Dies kann beim Aufbau von Lösungen helfen, und zwar nicht nur für die hier betrachteten Metalle.

6 Quellenverzeichnis

- Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) (2017): Telefonisches Gespräch mit Andreas Havenith (Geschäftsführer) am 28.07.2017.
- Adler, Bernhard; Müller, Ralf (2014): Seltene Erdmetalle: Gewinnung, Verwendung und Recycling. Ilmenau.
- Auerbach, R.; Brämer, T.; Brouwer, E.; Dierks, C.; Gassmann, A.; Dörr, M.; dos Santos, C.; Miehe, R.; Öhl, J.; Schmid, K.; Seikel, E.; Wüst, H. (2017): Schlussbericht zum Verbundvorhaben RECVAl-HPM - Innovative RE-use and ReCycling VALue Chain for High-Power Magnets - Innovative Reuse- und Recycling-Wertschöpfungskette für Hochleistungspermanentmagnete; BMBF-Förderkennzeichen: 033RF002.
- Ayet Puigarnau, Jordi (2017): Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Überprüfung des Geltungsbereichs der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro und Elektronik-Altgeräte (neue EEAG-Richtlinie) und über die Überprüfung der Fristen für die Erreichung der in Artikel 7 Absatz 1 der neuen EEAG-Richtlinie genannten Sammelziele sowie über die mögliche Festlegung gesonderter Sammelziele für eine oder mehrere der in Anhang III der Richtlinie aufgeführten Kategorien von Elektro- und Elektronik-Altgeräten. COM (2017) 171 final. Brüssel.
- Bakas, Ioannis; Herczeg, Márton; Vea, Eldbjørg Blikra; Fråne, Anna (2016): Critical Metals in Discarded Electronics: Mapping Recycling Potentials from Selected Waste Electronics in the Nordic Region. Copenhagen.
- Bamberger, Rainer; König, Anne; Pflaum, Alexander (Hrsg.) (2010): Mobile Servicewelten im Maschinenbau. Frankfurt a.M.
- Bast, Ulrich; Blank, Rolf; Buchert, Matthias; Elwert, Tobias; Finsterwalder, Florian; Hörnig, Gabriele; Klier, Tobias; Langkau, Sabine; Marscheider-Weidemann, Frank; Müller, J.-O.; Thürigen, Christian; Treffer, Frank; Walter, T. (2014): Abschlussbericht zum BMBF-Verbundvorhaben „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben“, FKZ 03X4622.
- Beckmann, Martin (2018): § 35 Rdn. 16 ff. In: Landmann, Robert; Rohmer, Ernst (2018): Umweltrecht KrWG, Stand Juli 2018. München.
- bifa (2018): Deutsche Telekom Projekt erfolgreich abgeschlossen. <http://www.bifa.de/news/detailseite/news/deutsche-telekom-projekt-erfolgreich-abgeschlossen>. aufgerufen am 11.09.2018.
- Bilitewsky, Bernd; Härdtle, Georg (2013): Abfallwirtschaft Handbuch für Praxis und Lehre. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg.
- Binnemans, Koen; Jones, Peter Tom; Blanpain, Bart; Van Gerven, Tom; Yang, Yongxiang; Walton, Allan; Buchert, Matthias (2013): Recycling of Rare Earths. A Critical Review. Journal of Cleaner Production 51. S. 1-22.
- Binnemans, Koen; Jones, Peter Tom (2013): Perspectives for the recovery of rare earths from end-of life fluorescent lamps. Journal of Rare Earths. Vol. 32, No.3. Mar. 2014. S. 195 –200.
- BMUB (2012): Begründung zur zweiten Verordnung zur Änderung der Deponieverordnung vom 14.11.2012.
- Böni, Heinz; Wäger, Patrick; Thiébaud, Esther; Du, Xiaoyue; Figi, Renato; Nagel, Oliver; Bunge, Rainer; Stäubli, Ariane; Spörry, Andy; Wolfensberger-Malo, Maya; Brechbühler-Peskova, Marie; Grösser, Stefan (2015): Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym. (Schlussbericht zum Projekt: e-Recmet). St. Gallen.
- Bräuning, Michael; Leschus, Leon; Rossen, Anja (2013): DERA Rohstoffinformationen 17, Ursachen von Preispeaks, -einbrüchen und -trends bei mineralischen Rohstoffen. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin.
- Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Bleher, Daniel; Pingel, Detlef (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachberichte 38. Freiburg, https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30038.pdf.
- Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Sutter, Jürgen (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Freiburg.
- Bulach, Winfried; Schüler, Doris; Sellin, Guido; Elwert, Tobias; Schmid, Dieter; Goldmann, Daniel; Buchert, Matthias; Kammer; Ulrich (2017): Elektrofahrzeugrecycling 2020 – Schlüsselkomponente Leistungselektronik. Endbericht zum BMBF Forschungsprojekt ElmoRel. Förderkennzeichen 16EM2032-1. Darmstadt.
- Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2009): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 27 – Vollzugshilfe.
- Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2017): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31A – Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes.
- Christensen, Clayton (2017): Disruptive Innovation. <http://www.claytonchristensen.com/key-concepts/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Clausen, Uwe; Geiger, Christiane (2013): Verkehrs- und Transportlogistik. Wiesbaden.
- CMA-Soft (2017): CMA-Soft - Container-App/ Mulden-App. <http://www.cma-soft.com/container-app.php>. aufgerufen am 13.03.2018.

- CUTEC (2016): Konzept zur Rückgewinnung von Seltenerdelementen sowie Platingruppenmetallen aus mineralischen Aufbereitungs- und Produktionsrückständen (MinSEM). <http://www.r4-innovation.de/de/minsem.html>. aufgerufen am 24.04.2017.
- Dageförde, Angela (2018): Altfahrzeug-Verordnung. In: von Lersner, Heinrich; Wendenburg, Helge (2018): Recht der Abfallbeseitigung, Kommentar. 2. Auflage 2015, Stand: Oktober 2018. Berlin.
- Defense Logistics Agency (2018): <http://www.dla.mil/HQ/Acquisition/StrategicMaterials/About/OurOffices.aspx>. aufgerufen am 28.06.2018.
- Delfmann, Werner (1999): Industrielle Distributionslogistik. In: J. Weber, H. Baumgarten (Hrsg.): Handbuch Logistik: Management von Material- und Warenflussprozessen. S. 181-201. Stuttgart.
- Diekmann, Carsten (2010): Sicherheitsleistung "reloaded". In: UPR - Umwelt und Planungsrecht 2010. München.
- Dietlein, Johannes (2018): § 7 Rdn. 10. In: Landmann, Robert von; Rohmer, Ernst (2018): Umweltrecht BImSchG, Stand Juli 2018. München.
- DSLV (2015): Die Beförderung von Abfällen: Leitfaden zur Umsetzung von KrWG, AbfAEV und weiterer abfallrechtlicher Vorschriften. DSLV Deutscher Speditionen und Logistikverband e. V., Bonn. online: [https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/04FA93428FA8FE40C1257EE50032D98A/\\$file/Leitfaden%20Bef%C3%B6rderung%20von%20Abf%C3%A4llen%20AbfAEV%20Stand%20Oktober%202015.pdf](https://www.dslv.org/dslv/web.nsf/gfx/04FA93428FA8FE40C1257EE50032D98A/$file/Leitfaden%20Bef%C3%B6rderung%20von%20Abf%C3%A4llen%20AbfAEV%20Stand%20Oktober%202015.pdf). aufgerufen am 13.03.2018.
- ecoinvent (2017): ecoinvent v3.4. <https://www.ecoinvent.org>. aufgerufen 31.03.2018.
- Electric Vehicle Research (2013): Honda Reuses Rare Earth Metals from NiMH Batteries for Hybrid Vehicles. Elwert, Tobias; Hoffmann, Matthias; Schwarz, Sabrina: Can recycling of NdFeB magnets be expected in Europe before 2030? In: Proceedings of EMC 2017, 2017.
- Elwert Tobias, Schwarz Sabrina, Bergamos Maik, Kammer Ulrich (2018): Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologieketten für NdFeB-Magnete – SEMAREC. In: Thiel Stephanie, Thomé-Kozmiensky, Karl J., Elisabeth; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 11. S. 253-271. Nietwerder.
- Elwert, Tobias; Hoffmann, Matthias; Schwarz, Sabrina (2017): Can recycling of NdFeB magnets be expected in Europe before 2030? In: Proceedings of EMC 2017, Düsseldorf.
- Enders, Rainald (2018): § 6 vor Rdn. 1. In: Giesbert, Ludger; Reinhard Michael (2018): BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand:01.10.2018. .
- Europäische Kommission (1998): ABI EG 1998 C 39/2 - Bekanntmachung zur Anwendung der EG-Wettbewerbsregeln im Postsektor und im Telekommunikationsbereich. Brüssel.
- Europäische Kommission (2011): Kom (2011) 25 endgültig - Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. Brüssel.
- Europäische Kommission (2013): Kom (2013) 442 final - Bericht an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Umsetzung der Rohstoffinitiative. Brüssel.
- Europäische Kommission (2014): SWD (2014) 171 final – Arbeitsunterlage der Kommissionsdienststellen über die Umsetzung der Rohstoffinitiative - Begleitunterlage zur Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Überprüfung der Liste kritischer Rohstoffe für die EU und die Umsetzung der Rohstoffinitiative. Brüssel.
- Europäische Kommission (2015): COM (2015) 614 final: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, Brüssel.
- Europäische Kommission (2017): COM (2017) 490 final: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste der kritischen Rohstoffe für die EU 2017. Brüssel.
- Europäische Union (2009): Richtlinie 2009/125/EG - zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Brüssel.
- Europäische Union (2018): Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle. OJ L 150, 14.6.2018, S. 109–140, Brüssel.
- European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. Brüssel.
- European Commission (2014): Report on Critical Raw Materials for the EU, Critical Raw Materials Profiles. Brüssel.
- European Commission (2016): Communication from the commission - Ecodesign Working Plan 2016-2019. COM (2016) 773 final. Brüssel.

- European weee registers network (EWRN) (2016): WEEE2 guidance document: Large-scale stationary industrial tools ("LSSIT"). <https://www.ewrn.org/publications-events/publications/new-weee2-exclusions/>. aufgerufen am 01.10.2016.
- EUWID (2017): Umweltpreis für Magneten aus Recyclingmaterial. EUWID 29.2017.
- EUWID (2018): Notiert. EUWID 11.2018. Gernsbach.
- Feige, Dieter (2012): Frachtnetzstrukturen, Optimierung von“. In: Klaus, Krieger, Krupp (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. S. 141-159. Wiesbaden.
- Fellenberg, Frank; Schiller, Gernot (2014): § 35 Rdn. 62. In: Jarass Hans; Petersen Frank (2014): Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar. München.
- Florenz, Karl-Heinz (2010): Europäisches Parlament, Plenarsitzungsdokument – Bericht vom 08.09.2010 über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, A 7-0229/2010. Brüssel.
- Franßen, Gregor (2004): Das Zwischenlager auf einer Deponie als immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsgegenstand. Zeitschrift für das Recht der Abfallwirtschaft Jahrgang 3, Ausgabe 6.
- Fraunhofer IOSB (2017): Begriffsdefinitionen rund um Industrie 4.0. <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/48960/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Frenz, Walter; Fischer, Kristian; Franßen, Gregor (2018): Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar. Heidelberg.
- Frenz, Walter (2017): § 17 KrWG Rdn. 372 ff. In: Frenz, Walter; Fischer, Kristian; Franßen, Gregor (2018): Kreislaufwirtschafts-, Abfall- und Bodenschutzrecht (KrW-/Abf- u. BodSchR).
- Fröhlich, Hannes (2015): Recycling von LCD Bildschirmgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 8. S. 313-324. Neuruppin.
- Giesbert, Ludger (2018): § 12 Rdn. 19. In: Giesbert, Ludger; Reinhard, Michael (2018): BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand: Oktober 2018. München.
- Giesbert, Ludger; Hilf, Juliane (2017): Elektro- und Elektronikgerätegesetz: Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten. Kommentar, 3. Auflage. München.
- Glass (2017): Glass. <https://www.x.company/glass/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Göpfert, Ingrid (2012): Entsorgungslogistik. In: Klaus, Krieger, Krupp (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. S. 155-161. Wiesbaden.
- Gorecki, Pawel; Pautsch, Peter (2014): Praxisbuch Lean Management. München.
- Greenpeace energy (2017): Das ist Greenpeace Energy. <https://www.greenpeace-energy.de/ueber-uns.html>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Groke, Matthias; Kaerger, Wolfgang; Sander, Knut; Bergamos, Maik (2017): Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). TEXTE 02/2017. Hrsg. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Gudehus, Timm (2010): Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Berlin/Heidelberg.
- H.C. Starck (2017): Umweltschonend, kompetent, einzigartig: Recycling bei H.C. Starck. <https://www.hcstarck.com/de/produkte/dienstleistungen/recycling.html>. aufgerufen am 13.02.2017.
- Häberle, Peter (2018): ElektroG § 3 Rdn. 17. In: Erbs, Georg; Kohlhaas, Max (2018): Strafrechtliche Nebengesetze KrWG, Stand Juli 2018. München.
- Handelsblatt (2016): Trickdiebe erleichtern Zulieferer um Millionen. <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/leoni-trickdiebe-erleichtern-zulieferer-um-millionen/14019400.html>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Hassan, Ali (2003): Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung. Hrsg. Umweltbundesamt. Berlin.
- Hausladen, Iris (2017): IT-gestützte Logistik: Systeme – Prozesse – Anwendungen. Springer Verlag, Wiesbaden.
- Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael (2017): Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung, Steuerung. Wiesbaden.
- Hilpert, Hanns Günther; Mildner, Stormy-Annika (2013): SWP-/BGR-Studie – Nationale Alleingänge oder internationale Kooperation – Analyse und Vergleich der Rohstoffstrategien der G20-Staaten. Berlin.
- Hirschmann, Winfred B. (1964): Profit from the Learnig Curve. In: Harvard Business Review, 1964, Jg. 42, S. 125 – 139. N.Y.
- Hoogerstrate, Tom Vander; Blanpain, Bart; Gerven, Tom Van; Binnemans, Koen (2014): From NdFeB Magnets towards the Rare-earth Oxides: A Recycling Process Consuming Only Oxalic Acid, The Royal Society of Chemistry Adv., 2014, 4, 64099.

House of Representatives (2016): National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2017 – 114th Congress 2d Session Report 114-840.

HSA (2017): Hochschule Augsburg: Logistische Prozesse in Bildsprache. (Projekt LogiPICs). <https://www.hs-augsburg.de/Wirtschaft/LogiPICs-Bildsprache-gegen-Arbeitskraeftemangel.html>. aufgerufen am 13.03.2018.

IDIS Management: Überblick über vertretene Hersteller. www.idis2.com/faqs.php#. aufgerufen am 15.07.2018.

Ihde, Gösta B. (1978): Distributions-Logistik. Stuttgart.

ISE (2016): Institut für seltene Erden und Metalle: Aktuelle und historische Marktpreise der Seltenen Erden und strategischer Metalle. <http://institut-seltene-erden.org/aktuelle-und-historische-marktpreise-der-gangigsten-seltenen-erden/>. aufgerufen am 31.03.2018.

Jarass, Christoph (2017): Bundes-Immissionsschutzgesetz: BImSchG 12. Auflage. München.

Jehle, Bernhard (2011): BMU Umweltinnovationsprogramm Abschlussbericht: Aufbau einer großtechnischen Anlage zur Zerlegung von Kathodenstrahlröhren.

JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) (2017): Annual Report – Year ended March 31 2017.

Kennedy, James C. (2016): Rare Earth Production, Regulatory USA/International Constraints and Chinese Dominance. In: Rare Earths Industry, Ismar Borges De Lima, Walter Leal Filho (Hrsg.) (2016), Elsevier, S. 37 ff.

Klages, Christoph (2018): § 35 Rdn. 15, 22. In: Giesbert, Ludger; Reinhard, Michael (2018): BeckOK Umweltrecht BImSchG, Stand August 2017. München.

Klaus, Peter (2002): Die dritte Bedeutung der Logistik. DVV. Hamburg.

Klaus, Peter (2007): Logistik – Flow Management. Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Logistik. Nürnberg.

Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. Wiesbaden.

Klett, Wolfgang (2018): DepV, § 1 Rdn. 104. In: Frenz, Walter; Fischer, Kristian; Franßen, Gregor (2018): Kreislaufwirtschaftsrecht, Abfallrecht und Bodenschutzrecht, Kommentar. Heidelberg.

Klose, Andreas; Stähly, Paul (2012): Standortwahl, Modelle und Methoden. In: Klaus, Krieger, Krupp (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. S. 421-462. Wiesbaden.

Konica Minolta (2017): Recycling Cerium Oxide Polishing Material. www.konicaminolta.com/about/research/opt/recycle_ce.html. aufgerufen am 25.10.2017.

Kopp-Assenmacher, Stefan; Berthold, Christof (2015): Kreislaufwirtschaftsgesetz : KrWG ; Kommentar. Berlin.

Kranert, Martin; Fischer, Klaus; Böhme, Lea (2013): Rohstoffsicherheit in Baden Württemberg – Abfälle aus Leuchtstoffröhren und Gasentladungslampen als Quelle von seltenen Erden. Stuttgart.

Kremberger, Benjamin; Krumm, Carsten (2018), Ordnungswidrigkeitengesetz, Kommentar, 5. Auflage, München.

Krishnamurthy, Nagaiyar; Gupta, Chiranjib Kumar (2015): Extractive Metallurgy of Rare Earths, Second Edition, CRC Press, S. 684. Boca Raton.

Küster, Grete (2002): Zur Sicherheitsleistung im Rahmen des BImSchG. Natur und Recht S.467.

Lieberman, Marvin B. (1984): The Learning Curve and Pricing in the Chemical Processing Industries. In: Rand Journal of Economics, Jg. 15, 1984, S. 213 – 228. Santa Monica.

Lightcycle Retourlogistik und Service GmbH (2017): Persönliches Gespräch mit Martin Grünwald (Direktor Finanzen & Logistik) am 31.07.2017. München.

Lucas, Rainer; Wilts, Claas Henning (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM) : Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.2 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal.

Luidold, Stefan (2013): Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendungen in Österreich. Leoben.

Luidold, Stefan; Poscher, Alexander; Kaindl, Matthias (2013): Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen. Berlin.

Mann, Thomas (2018): § 12 Rdn. 38, 75, 79. In: Landmann, Robert; Rohmer, Ernst (2018): Umweltrecht. Stand: Juli 2018.

Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Hummen, Torsten; Erdmann, Lorenz; Espinoza, Luis Tercero (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Berlin.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Wiesbaden.

Mineralölwirtschaftsverband (2018): Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresbericht 2018. Berlin.

- Nicklas, Cornelia; Siederer, Hartmut (2003): S. 220 Rdn. 18. In: Gaßner, Hartmut; Siederer, Wolfgang: Deponierecht - Kommentar zur Abfallablagerungsverordnung und zur Deponieverordnung. Berlin
- Oehlmann, Claas; Herlédan, Lisa (2014): Das Potenzial zur Ausweitung der Ökodesign- Richtlinie als Beitrag zu einer europäischen Kreislaufwirtschaft. EurUP 12.2014, Ausgabe 3. Berlin.
- Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics (2017): Strategic and Critical Materials Operations Report to Congress – Operations under the Strategic and Critical Materials Stock Piling Act during Fiscal Year 2016.
- Ohno, Taichi (1993): Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt a.M.
- Öko-Institut e.V. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. <https://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf>. aufgerufen am 31.03.2018.
- Osterried, Robert (2017): Container-App. <https://www.osterried.com/container-app/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Otto, Andreas (2002): Management und Controlling von Supply Chains, neue betriebswirtschaftliche Forschung. Wiesbaden.
- Oxfam (2017): Wie wir arbeiten. <https://www.oxfam.de/ueber-uns/oxfam/governance>. aufgerufen am 13.03.2018.
- PC-Welt (2009): Open-Source Geschäftsmodelle. <https://www.pcwelt.de/ratgeber/Open-Source-Geschaeftsmodelle-Ratgeber-Linux-104245.html>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Petersen, Frank (2014): § 13 Rdn. 14. In: Jarass, Hans; Petersen, Frank (2014) Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar. München.
- Petersen, Frank; Krohn, Susan (2004): Genehmigungsrechtliche Anforderungen an die Zwischenlagerung von Abfällen zur Beseitigung und Verwertung ab 2005. AbfallR 3/2004. Berlin.
- Plattform Industrie 4.0 (2017): Was ist Industrie 4.0. <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>. aufgerufen am 13.03.2018.
- PLoS (2014): Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0101298>. aufgerufen am 31.03.2018.
- Plowman, E. Grosvenor (1964): Elements of Business Logistics. Stanford.
- Porter, Michael E. (1986): Wettbewerbsvorteile. Spitzenleistungen erreichen und behaupten. Frankfurt a.M.
- Prelle, Rebecca (2018): Umweltverträgliches Produktdesign aus der Perspektive des Abfallrechts - Möglichkeiten und Grenzen des Abfallrechts. AbfallR 3/2018. Berlin.
- Prelle, Rebecca; Thärichen, Holger; Versteyl, Andrea (2008): Elektro- und Elektronikgerätegesetz – Kommentar. Berlin.
- Prockl, Günter (2012): Supply Chain Software. In: Klaus, Krieger, Krupp (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. S. 421-462. Wiesbaden.
- Remanence (2018): Remanence, project outputs. <http://www.project-remanence.eu/project-outputs>. aufgerufen am 23.08.2018.
- Repromag (2018): <http://repromag-project.eu/partners/>. aufgerufen am 10.09.2018.
- Resse, Moritz; Klages, Christoph (2014): § 3 Rdn. 349. In: Jarass, Hans; Petersen, Frank (2014) Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar. München.
- Richard, Peter; Krupp, Michael (2011): Optimale Prozesse. In: Recycling Technology, 2/2011. HUSS Verlag. München. Richard, Peter; Krupp, Michael (2011): Optimale Prozesse. In: Recycling Technology, 2/2011. S. 28-30. HUSS Verlag. München.
- Richard, Peter; Krupp, Michael (2011): Prozessoptimierung in Entsorgungsbetrieben. HUSS Verlag. München.
- Richard, Peter; Krupp, Michael (2012): Beziehungsnetzwerke. In: Klaus, Krieger, Krupp (Hrsg.) (2012): Gabler Lexikon Logistik. S. 39-91. Wiesbaden.
- Rohrbach, Adolph (1927): Economic Production of All-Metal Airplanes and Seaplanes. In: The Journal of the Society of Automotive Engineers, H. 1/1927, Bd. XX, S. 57 – 66. N.Y.
- RoHS/WEEE Technical Adaptation Committee (2012): Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment - RoHS 2 FAQ. http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/events_rohs3_en.htm. aufgerufen am 15.07.2018.
- RPA (2012): Stockpiling of Non-energy Raw Materials. Norfolk.
- Sander, Knut; Gößling-Reisemann, Stefan; Zimmermann, Till; Marscheider-Weidemann, Frank; Wilts, Henning; Schebeck, Liselotte; Wagner, Jörg; Heegn, Hanspeter; Pehlken, Alexandra et al. (2017): Recyclingpotenzial strategischer Metalle (Projekt ReStra). UBA-Texte 68/2017. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/recyclingpotenzial-strategischer-metalle-restra>.
- Sander, Knut; Schiling, Stephanie; Marscheider-Weidemann, Frank; Wilts, Henning; von Gries, Nadia; Hobohm, Julia (2012): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (Projekt RePro.). Meilensteinbericht August 2012. Dessau-Roßlau. http://www.oekopol.de/archiv/material/603_RePro_Meilensteinbericht_1.pdf.

- Schink, Alexander (2011): § 55 Rdn. 41. In: Mann Thomas; Püttner, Günter (2011): Handbuch der kommunalen Wissenschaft und Praxis 3. Auflage. München.
- Schink, Alexander (2017): Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht. Heft 6 , S. 337.
- Schink, Alexander; Versteyl, Andrea (2017): KrWG - Kommentar zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. 2. Auflage. Berlin.
- Schmidt-Kötters, Thomas (2018): § 4 Rdn. 130. In: Giesbert, Ludger; Reinhard Michael (2018): BeckOK Umweltrecht BImSchG. München.
- Schnedlitz, Peter; Lienbacher, Eva; Waldegg-Lindl, Barbara; Waldegg-Lindl, Marianne (2013): Last Mile: Die letzten – und teuersten – Meter zum Kunden im B2C ECommerce. In: Crockford, Gesa; Ritschel, Falk; Schmieder, Ulf-Marten (Hrsg.): Handel in Theorie und Praxis. S. 249-273. Wiesbaden.
- Schneider, Dieter (1965): Lernkurven und ihre Bedeutung für Produktionsplanung und Kostentheorie. In: ZfbF, Jg. 17, 1965, S. 501 – 515. Wiesbaden.
- Schomerus , Thomas; Fabian, Matthias; Fouquet, Dörte; Nysten, Jana Viktoria (2012): Juristisches Gutachten über die Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Elektro-Altgeräten im Sinne der zweiten Stufe der Abfallhierarchie. UBA-Texte 36/2014. Dessau-Roßlau.
- Schwind, Joachim (2018): § 17 KrWG Rdn. 81. In: von Lersner, Heinrich, Freiherr von; Wendenburg, Helge; Versteyl Ludger-Anselm (2018): Recht der Abfallbeseitigung des Bundes der Länder und der Europäischen Union, 2. Auflage 2015, Stand: Oktober 2018
- Sellin, Guido; Fröhlich, Hannes; Rasenack, Kai (2016): InAccess – Rückgewinnung von Indium durch effizientes Recycling von LCD Bildschirmen. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe Band 9. S. 163-176. Neuruppin.
- Siepmann, David (2016): Industrie 4.0 – Struktur und Historie. In: Roth, Armin (Hrsg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. S. 17-34. Berlin/Heidelberg.
- Spasojevic, Dijana; Swalens, Eric (2016): Study on Harmonisation of the Format for Registration and Reporting of Producers of Electrical and Electronic Equipment (EEE) to the National Register and on the Frequency of Reporting". Version v1.2. Hoeilaart.
- Statista (2017): Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken (Stand: 2014*; in Jahren). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Statistisches Bundesamt (2015): Verdienste und Arbeitskosten. Fachserie 16, Heft 1.
- Statistisches Bundesamt (2017): Zur Erstbehandlung angenommene Elektro- und Elektronikaltgeräte 2015. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Tabelle/TabellenErstbehandlung.html>. aufgerufen am 20.04.2017.
- Steglich, Mike; Feige, Dieter; Klaus, Peter (2016): Logistik-Entscheidungen. München.
- Stiftung ear (2018): ear-Portal. <https://www.ear-system.de/ear-verzeichnis/eba#no-back>. aufgerufen am 04.09.2018.
- Suse (2017): Geschichte von Suse. <https://www.suse.com/de-de/company/history/>. aufgerufen am 13.03.2018.
- Tompkins, James A.; Harmelink, Dale (Hrsg.) (1998): Das große Handbuch Distribution. Landsberg/Lech.
- U.S. Geological Survey (2017): Mineral Commodity Summaries 2017: U.S. Geological Survey.
- U.S. Geological Survey (2017): Minerals Yearbook 2012 bis 2016. Mittelwert. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/>. aufgerufen am 27.02.2017.
- Ueberschaar Maximilian, Schlummer Martin, Jalalpoor Daniel, Kaup Nora, Rotter Vera Susanne (2017): Potential and Recycling Strategies for LCD Panels from WEEE, Recycling 2017,2,7.
- Umweltbundesamt (2017): Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Bildschirme und Lampen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bildschirme-lampen#textpart-2>. aufgerufen am 04.05.2017.
- Umweltbundesamt (2018): Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union: Pro-Kopf-Emissionen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#textpart-2>. aufgerufen am 05.04.2018.
- Umweltbundesamt (2018b): Bildschirme und Lampen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bildschirme-lampen#textpart-2>. aufgerufen am 11.09.2018.
- Umweltpakt Bayern (2009): Einstufung, Verwertung und Entsorgung von LCD-Bildschirmen. http://www.izu.bayern.de/fachwissen/detail_fachwissen.php?pid=0201010100298. aufgerufen am 30.08.2017.
- UNCTAD (2017): Online Datenbank der United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). <http://unctadstat.unctad.org/EN>. aufgerufen am 07.09.2017.

VDI/VDE (2017): Glossar Industrie 4.0. [https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/2017-04_GMA - Industrie 4.0_Begriffe-Terms - VDI-Statusreport_Internet.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/2017-04_GMA_-_Industrie_4.0_Begriffe-Terms_-_VDI-Statusreport_Internet.pdf). aufgerufen am 13.03.2018.

Völker, Martin; Weckerle, Anika (2015): Rückgewinnung von Neodym aus Magneten von Computerfestplatten. Schlussbericht zum DBU-geförderten Forschungsvorhaben SeRec. Schwäbisch Gmünd.

Walther, Grit (2010): Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus. Wiesbaden.

Wannenwetsch, Helmut (2005): Vernetztes Supply Chain Management. Berlin/Heidelberg.

Wastebox (2017): Das ist Entsorgung 2.0. <https://www.wastebox.biz/>. aufgerufen am 13.03.2018.

Weber, Jürgen; Baumgarten, Helmut G. (Hrsg.)(1999): Handbuch Logistik: Management von Material- und Warenflussprozessen. Stuttgart.

Welge, Martin; Al-Laham, Andreas; Eulerich, Marc (2017): Strategisches Management: Grundlagen - Prozess – Implementierung. Wiesbaden.

Williamson, Oliver E. (1990): Die ökonomischen Institutionen des Kapitalismus: Unternehmen, Märkte, Kooperationen. Tübingen.

Wittmann, Antje; Beckmann, Martin (2007): Rechtsfragen der Zwischenlagerung von Abfällen. UPR - Umwelt und Planungsrecht 2007. München.

Woitschützke, Claus-Peter (2011): Verkehrsgeografie. Köln.

Womack, James P; Jones, Daniel T. (2003): Auf dem Weg zum perfekten Unternehmen - Lean Thinking. Frankfurt a.M.

Womack, James P; Jones, Daniel T.; Roos, Daniel (1991): The Machine that Changed the World. Washington, D.C .

Wrobel, Klaus (2009): Projektanbahnung in der Kontraktlogistik. Stuttgart.

Yang, Yongxiang; Walton, Allan; Sheridan, Richard; Güth, Konrad; Gauß, Roland; Gutfleisch, Oliver; Buchert, Matthias; Steenari, Britt-Marie; Van Gerven, Tom; Jones, Peter Tom; Binnemans, Koen (2016): REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. In: Journal of Sustainable Metallurgy 2017 Volume 3, Issue 1. S. 122–149.

Zepf, Volker (2015): Das verkannte Recyclingpotential der Seltenen Erden - Quantitative Ergebnisse für Neodym in Deutschland. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Goldmann, Daniel (2015): Recycling und Rohstoffe. Band 8. S. 463-476.

Zimmermann, Till; Gößling-Reisemann, Stefan (2014): Recycling Potentials of Critical Metals-Analyzing Secondary Flows from Selected Applications. Bremen.

7 Anhang

Anhang 1: Übersicht Auto-ID Systeme

ID-System	Kosten für Datenträger	Anbringung	Informationsgehalt	Informationsumfang	Typische Anwendungsgebiet	Robustheit	Lebensdauer
1D-Codes (Barcode)	0,01 ct	Kleben, Aufdruck	numerisch / alphanumerisch	1 - 2000 Zeichen	Handel, Logistik, etc.	niedrig	gering - mittel
2D-Codes (QR-Code)	0,01 ct	Kleben, Aufdruck	numerisch / alphanumerisch	1 - 5000 Zeichen	mechan. Bauteile, Werkzeuge	hoch	hoch
3D-Codes	keine Info	Kleben	numerisch / alphanumerisch	0,6 - 1,8 MB	Marketing (Werbeanzeigen/Werbeplakate)	hoch	hoch
RFID passiv (LF, 30-500 kHz)	0,30ct - 2,50 €	kleben, einbetten in Material, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	4 - 5000 Bytes	Fertigung, Logistik, Müllentsorgung, Gas- und Chemikalienbehälter, Automobilbranche, Tieridentifikation	hoch	hoch
RFID aktiv (LF, 30-500 kHz)	keine Info	kleben, einbetten in Material, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	4 - 5000 Bytes	Fertigung, Logistik, Abfallentsorgung, Gas- und Chemikalienbehälter, Automobilbranche, Tieridentifikation	hoch	hoch
RFID passiv (HF, 3-30MHz, Smart Tags/NFC)	0,30 ct - 2,50 €	kleben, einbetten in Material, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	bis 90000 Zeichen, 4 - 5000 Bytes	Fertigung, Logistik, Abfallentsorgung, Zutrittskontrollsysteme, Zahlungsverkehr, Anwesenheitskontrolle (1-bit-Transponder)	hoch	hoch
RFID aktiv (HF, 3-30MHz)	0,75 ct - 1€	kleben, einbetten in Material, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	bis 90000 Zeichen, 512 - 32000 Bytes	Fertigung, Logistik, Abfallentsorgung, Zutrittskontrollsysteme, Zahlungsverkehr, Anwesenheitskontrolle (1-bit-Transponder)	hoch	hoch

RFID passiv (UHF, 850-950 MHz, 868 MHz Europa, 915 MHz USA, 924MHz Japan)	1,5 - 10 €	kleben, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	4 - 5000 Bytes	Fertigung, Logistik, Abfallentsorgung, Gas- und Chemikalienbehälter	hoch	hoch
RFID aktiv (UHF, 850-950 MHz, 868 MHz Europa, 915 MHz USA, 924MHz Japan)	keine Info	kleben, verschrauben	numerisch / alphanumerisch	512 - 128000 Bytes	Fertigung, Logistik, Abfallentsorgung, Gas- und Chemikalienbehälter	hoch	hoch
Bluetooth/Beacons	ca. 16 €	Kleben	numerisch / alphanumerisch	bis 1Mbit	Museum und Ausstellungsbereiche, Produktinformationen, Wegbeschreibungen	mittel	gering
Sensorknoten	10 - 20 €	kleben, verschrauben, einbetten	numerisch / alphanumerisch	mehrere Mbits	Katastrophenschutz, Militär, Gesundheitswesen, Landwirtschaft	hoch	mittel - hoch

Anhang 2: Beschreibung der Auto-ID Systeme

ID-System	Beschreibung	Quelle
1D-Codes (Barcode)	Die Breiten und Abstände der Striche (Module) speichern die Informationen.	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch"
2D-Codes (QR-Code)	Bestehen aus kleinen Quadraten, diese sind sogar übereinander geordnet und speichern die Information. Sogar bei 30% Verlust des Codes ist eine Dekodierung möglich	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch"
3D-Codes	Der 2D-Code wird um eine Dimension erweitert, es werden Farben dazu verwendet.	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", http://www.etikettenwissen.de/wiki/Ultracode
RFID passiv (LF, 30-500 kHz)	Erlaubte Frequenz 9 ... 135 kHz), Read-only-Transponder - besonders kleine Transponder mit niedrigen Herstellungskosten, Reichweite besser als Read-Write-Transponder, Read-Write-Transponder - kann öfters beschrieben werden (EEPROM) und einfache Kommandos vom Lesegerät ausführen, Reichweite bis 0,5 Meter	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", Krupp et al. (2010): "Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik"
RFID aktiv (LF, 30-500 kHz)	Erlaubte Frequenz 9-135 kHz) , geringe Übertragungsraten und -abstände, durch induktive Kopplung können die RFIDs passiv mit Energie versorgt werden	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", Krupp et al. (2010): "Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik"
RFID passiv (HF, 3-30MHz, Smart Tags/NFC)	Induktive Kopplung - gute Durchdringung von Objekten, erlaubte Frequenzen: 6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz, 40,680 MHz, Kryptographie und komplexe Algorithmen möglich, nur Read-Write-Transponder möglich, Antikollisionstechnik - mehrere Transponder stören sich gegenseitig nicht, Reichweite bis 1 Meter, Auf Metall kommt es zu Verstimmungen der Antenne	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", http://www.euroid.com/rfid-transponder/rfid-lf-hf-uhf/ , Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik Thomas Krupp S. 166
RFID aktiv (HF, 3-30MHz)	induktive Kopplung - gute Durchdringung von Objekten, erlaubte Frequenzen: 6,78 MHz, 13,56 MHz, 27,125 MHz, 40,680 MHz, Kryptographie und komplexe Algorithmen möglich, höhere Reichweite als passiv, auf Metall kommt es zu Verstimmungen der Antenne, Bulk-Erfassung mit Einschränkungen möglich	Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", Krupp et al. (2010): "Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik"

<p>RFID passiv (UHF, 850-950 MHz, 868 MHz Europa, 915 MHz USA, 924MHz Japan)</p>	<p>elektromagnetische Welle - keine Störung durch andere Magnetfelder (Roboter, Motoren) aber werden gestört durch Objekte, schnelle Lesegeschwindigkeit, hohe Reichweite 1 - 3 Meter, Kryptographie und komplexe Algorithmen möglich, Bulk-Erfassung möglich</p>	<p>Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", Krupp et al. (2010): "Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik"</p>
<p>RFID aktiv (UHF, 850-950 MHz, 868 MHz Europa, 915 MHz USA, 924MHz Japan)</p>	<p>elektromagnetische Welle - keine Störung durch andere Magnetfelder (Roboter, Motoren) aber werden gestört durch Objekte, schnelle Lesegeschwindigkeit, hohe Reichweite 1 - 100 Meter, Kryptographie und komplexe Algorithmen möglich, Bulk-Erfassung möglich</p>	<p>Finkenzeller (2015): "RFID-Handbuch", Krupp et al. (2010): "Praxishandbuch IT-Systeme in der Logistik"</p>
<p>Bluetooth/Beacons</p>	<p>Basierend auf der drahtlosen Bluetooth-Low-Energy-Technologie, Batteriebetrieben oder festen Anschluss, 2,4 GHz Frequenz, 3 bis 30m Reichweite, Apps können die Reichweite identifizieren, groß im Vergleich zu RFID Transponder, Dauerhaftes aussenden eines Signals,</p>	<p>https://www.techtag.de/it-und-hightech/warum-2015-das-jahr-der-ibeacons-wird/; https://www.mobilezeitgeist.com/beacon-kompodium-am-anfang-steht-die-technik/; http://www.fliedl-agrarartechnik.de/kleinsender-grosser-nutzen-intelligente-beacons/150/5011/5964/; Zanger (2015): "Events und Emotionen: Stand und Perspektiven der Eventforschung"</p>
<p>Sensorknoten</p>	<p>Drahtlose Sensorknoten, bestehend aus einer Anzahl von Sensorik und Micro-Controller, eine Stromversorgung ist notwendig,</p>	<p>https://www.tu-chemnitz.de/informatik/it-buendnis/ringvorlesung/ss08/fohlen/Anwendungen.pdf, https://www.digikey.de/de/product-highlight/s/stmicroelectronics/iot-wireless-sensor-nodes, https://de.wikipedia.org/wiki/Sensornetz</p>

Anhang 3: Exkurs zu Kosten einer TUL Logistik

Logistische Kosten in Transport, Umschlag und Lager fächern sich, wie in folgender Tabelle gezeigt, weiter auf:

	Transport	Umschlag	Lager
Personalkosten d.h. Lohnkosten + Lohnnebenkosten	<p>Personalkosten für den Fahrer:</p> <p>Errechnet aus Arbeits- bzw. Transportzeit in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Entfernung und bezogen auf die Tonnage des transportierten Materials.</p> <p>D.h. Personalkosten bei einem Binnenschiff sind geringer als bei einem Straßentransport, auch wenn das Binnenschiff langsamer unterwegs ist. Kompensiert wird dies durch die deutlich größere transportierte Menge, auf welche die Personalkosten verteilt werden.</p>	<p>Personalkosten für Handhabung.</p> <p>Errechnet aus Dauer für Handhabung und deren zeitlichem Anteil an der gesamten Zeit, die ein Mitarbeiter zu Verfügung steht.</p> <p>Typisch sind hier z.B. Pickkosten in Form von Mitarbeiterminuten pro Griff in einen Lagerplatz, um die bestellte Sendung zusammen zu stellen.</p> <p>In der betrachteten Branche kostete eine Arbeitsstunde im Jahr 2012 28,10€. Die Personalkosten setzen sich dabei aus Lohn- und Lohnnebenkosten zusammen. Da die Erhebung der Arbeitskosten sich auf das Jahr 2012 bezieht, kann davon ausgegangen werden, dass sich die vormals genannten Kosten noch weiter erhöht haben.</p> <p>Vgl. Statistische Bundesamt (2015)</p>	<p>Personalkosten für das Personal, das für den Betrieb eines Lagers notwendig ist.</p> <p>In diesem Zusammenhang sind Aktivitäten wie Einlagerung, Umlagerung und Auslagerung relevant, die immer noch meist nicht automatisiert vollzogen werden (Ausnahme wäre ein vollautomatisiertes Palettenlager)</p> <p>Ähnlich wie die Personalkosten zum Umschlag, werden die Personalkosten im Lager behandelt und auf Einheiten umgelegt. Allerdings spielt aufgrund der Aktivitäten die Einheit „Materialbewegung“ eine Rolle. Da so die Bewegungshäufigkeit von Materialien im Lager berücksichtigt wird. So ist es z.B. nicht sinnvoll in einem Lager, in welchem extrem selten ein und ausgelagert wird, Personal vorzuhalten. Das würde durch diese Berechnung transparent.</p>

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Anlagenkosten</p>	<p>Miete oder Abschreibung für Transportmittel, also LKW, Lokomotive, Binnenschiff, Frachtschiff oder Flugzeug sowie ggf. für Transporthilfsmittel (Aufbauten Behälter etc.)</p> <p>Treibstoffkosten und Maut/Gebühren</p> <p>Diese Kosten werden in der Regel auf die transportierte Menge umgelegt, d.h. je größer die transportierte Menge, desto geringer die Kosten pro Einheit.</p>	<p>Miete und/oder Abschreibung für Hilfsmittel/Anlagen im Umschlag z.B. Kräne, Stapler, Hubwagen, Wechselbrücken-Umsetzer etc.</p> <p>Treibstoffkosten, Energiekosten und ggf. Gebühren</p> <p>Diese Kosten werden in der Regel auf die umgeschlagene Menge umgelegt. D.h. je größer die umgeschlagene Menge, desto geringer die Kosten pro Einheit.</p>	<p>Miete und/oder Abschreibung auf Immobilien (auch Rangierflächen außerhalb des Lagers)</p> <p>Heizungs-/Kühlungskosten (temperaturgeführte Lager), Energiekosten, Brandschutzkosten, Renovierung, Versicherung etc.</p> <p>Hinzu kommen Abschreibungen, die anfallen falls Ware im Lager veraltet zu Bruch geht und nicht weiter dem Zweck entsprechend eingesetzt werden kann.</p> <p>Diese Kosten werden in der Regel auf die eingelagerten Waren umgeschlagen und hier auf sinnvolle Einheiten wie Tonnage Paletten, Artikel oder SKU (stock keeping units), also Artikel die per Artikelnummer in einem Lager geführt werden.</p>
	<p>Gemeinkosten</p> <p>Kosten für Administration und Anlagen, die für die Abwicklung der administrativen Prozesse nötig sind (Bürogebäude, Rechner, Telefonanlagen). Diese werden nach einem Schlüssel (z.B. Umsatzanteil eines Bereichs auf diesen Gemeinkosten umgeschlagen und zu den direkten Kosten hinzugerechnet).</p>		
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Weitere kalkulatorische Kosten</p>	<p>Berücksichtigung von alternativen Einsatzmöglichkeiten der Transportmittel und Fahrer als sogenannte Opportunitätskosten, also Verzicht auf höhere Renditen wenn sich für eine Aktivität entschieden wird.</p>		<p>Bestandshaltungskosten bzw. Kapitalbindungskosten entstehen dadurch, dass Ware im Lager zeitlich gebunden ist und für diese Zeit der Wert der Ware gebunden ist. D.h. um die Ware zu beschaffen, wurde Geld ausgegeben, das zu einem späteren Zeitpunkt durch den Verkauf der Ware wieder zurückgewonnen wird. Zur Überbrückung der Zeit zwischen Beschaffung und Verkauf muss die Ware vor-</p>



finanziert werden. Dazu ist Eigenkapital oder ein Kredit nötig.

Die Kosten für dieses Kapital sind real zu bezahlende Kosten in Form von Zinsen. Diese sind insofern kalkulatorisch, als der Zinssatz nicht uneindeutig ist. In der Regel wird ein interner Zinssatz angenommen, der sich aus Eigenkapitalverzinsung und Fremdkapitalverzinsung zusammensetzt.

Oben ist von Menge und Einheit die Rede, auf welche Kosten umgeschlagen werden. Je nachdem, in welche Branche oder in welchem Abschnitt der Wertschöpfungskette einer Branche gearbeitet wird, ist die Bezugsgröße unterschiedlich.

Gängig sind Gewicht in Kilogramm oder Tonnen sowie Volumen in Kubikmetern oder auch Standardmaßen wie Paletten (120x120x80cm). Meist ist entscheidend, welche Einheit den Abschnitt dominiert. D.h. stößt ein Transportmittel wegen der Tonnage an seine Kapazitätsgrenze oder wegen des Laderaums.

Es sind auch andere Einheiten gängig wie Sendungen, Kollo (oder Singular Kollo = Packstück) sowie Stück oder Aufträge.

Transportkosten sind sog. sprungfixe Kosten d.h. der Transport mit einem Transportmittel (z.B. LKW) ist fix, springt aber um dieselben Kosten nach oben sobald ein zweiter LKW benötigt wird. Das bedeutet auch, dass die Reduzierung von transportiertem Material kostenseitig nur sinnvoll ist, wenn dadurch ein Transportmittel gespart wird. (anders ist dies, wenn z.B. mit einem Dienstleister ein Preis pro Palette vereinbart wurde).

Oben ist von Menge und Einheit die Rede auf welche Kosten umgeschlagen werden. Je nachdem in welche Branche oder in welchem Abschnitt der Wertschöpfungskette einer Branche gearbeitet wird ist die Bezugsgröße unterschiedlich.

Gängig sind Gewicht in Kilogramm oder Tonnen sowie Volumen in Kubikmetern oder auch Standardmaßen wie Palette (120x120x80cm) oder Container.

Kalkulatorische Kosten, die zur Argumentation von Lagerhaltung meist angeführt werden, sind Fehlmengenkosten. D.h. den Kosten für Lagerhaltung wird entgegengestellt, was es kosten würde, wenn ein Artikel nicht gelagert und damit auch nicht verfügbar ist. Relevant sind hier Kosten für einen Sonderprozess für die schnelle Beschaffung eines fehlenden Artikels, Kosten die entstehen weil Umsatz verloren geht, Kosten die entstehen wenn ein Kunde „abspringt“, wenn nicht geliefert werden kann.

