TEXTE
52/2019

Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutz-aspekten (RePro)

Abschlussbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 52/2019

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3711 95 318
FB000077

Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro)

Abschlussbericht

von

Knut Sander
Ökopol GmbH, Hamburg

Frank Marscheider-Weidemann
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Henning Wilts
Wuppertal Institut, Wuppertal

Julia Hobohm
TU Hamburg-Harburg, Hamburg

Thorsten Hartfeil
Fraunhofer ISC Projektgruppe IWKS, Alzenau

Dirk Schöps
ELPRO Produkt Recycling GmbH, Braunschweig

René Heymann
Heymann Brandt deGelmini, Berlin

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:
Ökopol Institut für Ökologie und Politik GmbH
Nernstweg 32-34
22765 Hamburg

Abschlussdatum:
Dezember 2018

Redaktion:
Fachgebiet III 1.6 Produktverantwortung
Regina Kohlmeyer, Christian Kitazume

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2019

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

Kurzbeschreibung

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens RePro war die Entwicklung zielgerichteter Maßnahmen und Instrumente zur besseren Nutzung bisher nicht ausgeschöpfter Potenziale zur Kreislaufführung von umwelt- und ressourcenrelevanten Metallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG). Es umfasste die folgenden Arbeitsbereiche:

- Identifikation und Auswahl von ressourcenrelevanten Metallen (=RePro-Metalle),
- Massenbilanzierung von RePro-Metallen in den ausgewählten Produkten (RePro-Produkte) und EAG (RePro-EAG).
- Analyse von Sammlung, Behandung RePro-EAG und Rückgewinnung von RePro-Metallen.
- Entwicklung von Empfehlungen zur optimierten Steuerung, Erfassung und Entsorgung von EAG im Hinblick auf die Kreislaufführung umwelt- und ressourcenrelevanter Metallen.

Der Fokus der Untersuchung lag auf den EAG aus privaten Haushalten im Sinne des § 3 ElektroG.

Die Studie zeigt, dass wesentliche Potenziale zur Erfassung und Rückgewinnung von RePro-Metallen nicht ausgeschöpft sind und es werden konkrete Empfehlungen zur Optimierung der Sammlung, der Vorbehandlung und Rückgewinnung von RePro-Elementen sowie zur Setzung geeigneter Rahmenbedingungen gegeben.

Alle Untersuchungen und Darstellungen beziehen sich auf die Situation vor Umsetzung des neuen ElektroG im Jahr 2015. Dementsprechend beziehen sich auch Definitionen wie z. B. die Sammelgruppen auf den Stand vor dem ElektroG des Jahres 2015.

Abstract

The main objective of this study (RePro) was the development of targeted measures and instruments to make better use of previously unexploited potenzial for recycling environmentally and resource-relevant metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE). It comprised the following areas of work:

- Identification and selection of resource-relevant metals (=RePro metals),
- Mass balancing of RePro metals in selected products (RePro products) and WEEE (RePro-WEEE),
- Analysis of collection, treatment of RePro-WEEE and recovery of RePro metals .
- Development of recommendations for optimized control, collection and disposal of WEEE for improved recycling of environmentally and resource-relevant metals.

The focus of the study was on the WEEE from private households in the sense of § 3 ElektroG.

The study shows that essential potentials for the collection and recovery of RePro metals have not been exhausted and concrete recommendations are given for the optimisation of the collection, pre-treatment and recovery of RePro elements as well as for the setting of suitable framework conditions.

All investigations and presentations refer to the situation before the implementation of the new ElektroG in 2015. Accordingly, definitions such as the collection groups also refer to the situation before the ElektroG in 2015.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 6
Abbildungsverzeichnis 17
Tabellenverzeichnis 29
Abkürzungsverzeichnis 36
Zusammenfassung 42
Summary 60
1 Ziele, Hintergründe und Vorgehensweise 75
2 Auswahl ressourcenrelevanter Metalle 79
2.1 Metallvorauswahl 79
2.2 Beurteilung der Ressourcenrelevanz von Metallen 81
2.3 Wirtschaftliche Bedeutung für die Elektro- und Elektronikindustrie 82
2.3.1 Kriterium 1: Einsatz des Metalls in Elektro(nik)produkten 82
2.3.2 Kriterium 2: Substituierbarkeit 83
2.3.3 Kriterium 3: Bedeutung für Zukunftstechnologien 83
2.3.4 Weitere Kriterien 84
2.4 Versorgungsrisiko 84
2.4.1 Kriterium 1: Länderkonzentration der Reserven 84
2.4.2 Kriterium 2: Länderrisiko globale Produktion 84
2.4.3 Kriterium 3: Firmenkonzentration der globalen Produktion 85
2.4.4 Kriterium 4: Anteil der Nebenproduktion 85
2.4.5 Kriterium 5: Recyclingfähigkeit 85
2.4.6 Kriterium 6: Recyclingquote 86
2.4.7 Kriterium 7: Umweltrelevanz der Rohstoffbereitstellung (KEA) 86
2.5 Gewichtung der Auswahlkriterien 87
2.6 Datenerhebung zu den Kriterien und Metallen 87
2.7 Bewertung und Auswahl der ressourcenrelevanten Metalle 92
2.8 Liste der RePro-Metalle 93
2.9 Beryllium und Antimon 93
2.9.1 Beryllium 93
2.9.1.1 Anwendungsfelder 93
2.9.1.2 Toxizität von Beryllium(verbindungen) 95
2.9.1.3 Entsorgung 95
2.9.2 Antimon 96

2.9.2.1 Anwendung 96
2.9.2.2 Toxizität 96
2.9.2.3 Entsorgung 96
2.9.2.4 Schlussfolgerungen 97
3 Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen 98
3.1 Zielstellung....98
3.2 Methodik 98
3.3 Entwicklung der Metall-Komponenten-Matrix....98
3.3.1 Metallauswahl....98
3.3.2 Metall-Komponenten-Matrix....99
3.3.2.1 Gold 99
3.3.2.2 Silber 100
3.3.2.3 Palladium 100
3.3.2.4 Kobalt 100
3.3.2.5 Gallium 100
3.3.2.6 Indium 100
3.3.2.7 Zinn 101
3.3.2.8 Neodym 101
3.3.2.9 Yttrium 101
3.3.2.10 Tantal 101
3.3.2.11 Auswahl der Komponenten 102
3.4 Entwicklung der Komponenten-Produkt-Matrix 102
3.4.1 Produktauswahl mit Fokus auf bestückte Leiterplatten und Lote....103
3.4.2 Produktauswahl mit Fokus auf Batterien....103
3.4.3 Produktauswahl mit Fokus auf Bildschirmbeschichtungen/Leuchtstoffe und LED....104
3.4.4 Produktauswahl mit Blick auf Magnete 104
3.4.5 Produktauswahl mit Blick auf optoelektronische Komponenten 104
3.4.6 Gesamtübersicht Komponenten-Produkt-Matrix (RePro-Geräte)....105
3.5 Produktbezogene Quantifizierung der Metalle....108
3.5.1 Literaturstudie....108
3.5.2 Identifizierung von Datenlücken 108
3.6 Chemische Analyse zur Lokalisierung und Quantifizierung der RePro-Metalle....112
3.6.1 Technische und normative Grundlagen der chemischen Analysen....112

3.6.2 Probenvorbereitung 113
3.6.2.1 3.3 Tablet Computer 113
3.6.2.2 3.6 Beamer 114
3.6.2.3 3.7 Multifunktionsdrucker 114
3.6.2.4 3.9 Navigationsgeräte 114
3.6.2.5 3.11 Smartphone 114
3.6.2.6 3.21 MP3 Player 114
3.6.2.7 Probenaufschluss 114
3.6.3 Messstrategie 115
3.6.4 Ergebnisse der chemischen Analysen 116
3.7 Stoffstrombezogene Quantifizierung der Metalle in den RePro-Geräten 119
3.7.1 Marktrecherchen 119
3.7.2 Gold 124
3.7.3 Silber 126
3.7.4 Palladium 127
3.7.5 Kobalt 129
3.7.6 Gallium 131
3.7.7 Indium 133
3.7.8 Zinn 134
3.7.9 Neodym 136
3.7.10 Yttrium 138
3.7.11 Weitere Metalle der Seltenen Erden 140
3.7.12 Tantal 141
3.7.13 Dynamiken 143
3.7.14 Zusammenführung 144
3.8 Potenzielle Altgerätemengen 148
3.9 Sortieranalyse 155
3.9.1 Vorgehen 155
3.9.1.1 Sammelgruppe 3 – Informations- und Kommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik 156
3.9.1.2 Sammelgruppe 5 – Haushaltskleingeräte und andere Geräte 157
3.9.2 Ergebnisse Sammelgruppe 3 – IKT und Unterhaltungselektronik 157
3.9.3 Ergebnisse Sammelgruppe 5 – Haushaltskleingeräte und andere Geräte 158
3.9.4 Diskussion der Ergebnisse 159

3.10 Größen der RePro-Altgeräte 161
3.11 Erfasste Mengen 163
3.12 Weitere Verbleibwege 164
3.12.1 EAG im Restabfall 164
3.12.1.1 Restmüllanalyse INTECUS 165
3.12.1.2 Restmüllanalyse Dresden 167
3.12.1.3 Restmüllanalyse Hamburg 168
3.12.1.4 Fazit 168
3.12.2 Sperrmüllsammlung 169
3.12.3 Export 169
4 Sammlung von EAG 171
4.1 Einfluss von Nähe und Bequemlichkeit auf das Entsorgungsverhalten bei Elektroaltgeräten 171
4.2 Status quo der zeitlichen Verfügbarkeit des Erfassungssystems örE 175
4.3 Sammlung durch den Handel 180
4.3.1 Status quo der Sammlung durch den Handel in Deutschland 180
4.3.2 Die Rolle des Handels in Sammelsystemen anderer europäischer bzw. EU-Länder 181
4.3.2.1 Belgien 181
4.3.2.2 Italien 182
4.3.2.3 Niederlande 183
4.3.2.4 Dänemark 184
4.3.2.5 Österreich 184
4.3.2.6 Frankreich 185
4.3.2.7 Irland 185
4.3.2.8 Schweiz 186
4.3.2.9 Schweden 187
4.3.2.10 Großbritannien 188
4.3.3 Sammlung im Handel in EU-Ländern - Zusammenfassung 188
4.4 Ergänzende Sammelsysteme in EU-Staaten 190
4.4.1 Samlaren in Schweden 191
4.4.1.1 Verbraucherfreundlichkeit 192
4.4.1.2 Zweckmäßigkeit des Behälters 192
4.4.1.3 Kosteneffizienz 192
4.4.2 Örebrö-modellen in Schweden 192

4.4.2.1 Verbraucherfreundlichkeit 193
4.4.2.2 Zweckmäßigkeit des Behälters 193
4.4.2.3 Kosteneffizienz 193
4.4.3 Umeva-modellen in Schweden 194
4.4.3.1 Verbraucherfreundlichkeit 194
4.4.3.2 Zweckmäßigkeit des Behälters 194
4.4.3.3 Kosteneffizienz 194
4.4.4 Skellefteå-Anhänger in Schweden 195
4.4.4.1 Verbraucherfreundlichkeit 195
4.4.4.2 Zweckmäßigkeit des Behälters 195
4.4.4.3 Kosteneffizienz 195
4.4.5 Zwischenfazit zu ergänzenden Sammelsystemen in Schweden 195
4.4.6 Kerbside system in Großbritannien 196
4.4.7 Boxensammlung – Beispiel Red Box in Schweden 197
4.4.8 Boxensammlung – Beispiel Jekko in den Niederlanden 198
4.4.9 Sammlung von Elektrokleingeräten mit Depotcontainern in Deutschland 198
4.4.9.1 Sammelmengen 198
4.4.9.2 Kosten der Sammlung über Depotcontainer 210
4.4.9.3 Zwischenfazit 210
4.5 Nutzwertanalyse 211
4.5.1 Anforderungen an die Sammlung durch die neue WEEE-II-Richtlinie 211
4.5.2 Nutzwertanalyse: Beschreibung und Ziel 212
4.5.2.1 Alternativenentwicklung zur ergänzenden Erfassung von Elektroaltgeräten 213
4.5.2.2 Zielformulierung und Zielkriterienbestimmung 214
4.5.2.3 Oberkriterium I: Erreichbarkeit der Sammelsysteme 215
4.5.2.4 Oberkriterium II: Akzeptanz beim Verbraucher 216
4.5.2.5 Oberkriterium III: Diebstahlrisiko 217
4.5.2.6 Oberkriterium IV: Qualitativer Zustand der EAG 217
4.5.2.7 Oberkriterium V: Wirtschaftlichkeit 217
4.5.2.8 Zielkriteriengewichtung 218
4.5.2.9 Bewertung der Zielerreichung 222
4.5.2.10 Nutzwertermittlung 224
4.5.2.11 Alternativenreihung 224
4.5.2.12 Ergebnisanalyse 225

4.5.2.13 Bewertung und Vergleich der Sammelsysteme 225
4.5.3 Beschreibung der Annahmen zu den Rahmenbedingungen der Sammlung 225
4.5.3.1 Kriterium I: Erreichbarkeit der Sammelsysteme 226
4.5.3.2 Akzeptanz bei den Verbrauchern 234
4.5.3.3 Zustand der Geräte 240
4.5.3.4 Wirtschaftlichkeit und Aufwand 243
4.5.4 Sensitivitätsanalyse 256
4.5.5 Depotcontainer 262
4.5.6 EAG-Tonne 263
4.5.7 Händlersammlung gesamt/ Händlersammlung > 400 m^2 264
4.5.8 Wertstoffmobil 265
4.5.9 Wertstoffhof 266
4.5.10 Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude 267
4.6 Pfand 269
4.6.1 Erfahrungen mit Pfandsystemen für EAG 269
4.6.2 Exkurs: Pfand bei Verpackungen und Batterien 269
4.6.3 Diskussion der Pfandhöhe 271
4.6.4 Auswirkungen eines Pfandsystems für kleine EAG 273
4.6.4.1 Umwelt 273
4.6.4.2 Verbraucher 273
4.6.4.3 Gesellschaft 273
4.6.4.4 Hersteller & Handel 273
4.6.4.5 Bestehende Sammelsysteme 274
4.6.4.6 Schlussfolgerung 274
4.6.5 Fazit 276
4.7 Kommunikationskonzept 283
4.7.1 Entsorgungsverhalten und Getrenntsammlungsmotivation der Verbraucherinnen und Verbraucher 283
4.7.1.1 Vorgehensweise 283
4.7.1.2 Getrenntsammlungsbewusstsein 283
4.7.1.3 Mülltrennungsverhalten 283
4.7.1.4 Mülltrennungseinstellung 283
4.7.2 Bestehende Kommunikationskampagnen zur Sammlung von Elektroaltgeräten 284
4.7.3 Anforderungsprofil für die Kommunikationskampagne 284

4.7.3.1 Auswahl der Zielgruppen 285
4.7.3.2 Gruppierung der Elektrogeräte 285
4.7.3.3 Analyse der Zielgruppen und ihrer Motive nach Gerätearten 286
4.7.4 Touchpoints 297
4.7.5 Kommunikationskonzept 298
4.7.5.1 Strategische Botschaft 298
4.7.6 Mustermotive 299
4.7.7 Charakterisierung und Bewertung des Kampagnenansatzes 300
4.7.8 Ausblick auf die nächsten Schritte 301
5 Rückgewinnung von RePro-Metallen 302
5.1 Gegenstand und Vorgehen 302
5.2 Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle 302
5.3 Rückgewinnungskonflikte 304
5.4 Ableitung von Behandlungsempfehlungen 306
5.4.1 PC (RePro Produktgruppe 3.1) 307
5.4.2 Laptops (RePro Produktgruppe 3.2), Tablet (RePro Produktgruppe 3.3) 308
5.4.3 Festplatten Extern (RePro Produktgruppe 3.4) 310
5.4.4 USB Sticks (RePro Produktgruppe 3.5), MP3 Player (RePro Produktgruppe 3.21) 310
5.4.5 Beamer (RePro Produktgruppe 3.6) 311
5.4.6 Multifunktionsdrucker (RePro Produktgruppe 3.7) 312
5.4.7 Schnurlose Telefone (RePro Produktgruppe 3.8) 312
5.4.8 Navigationsgeräte (RePro Produktgruppe 3.9) 313
5.4.9 Mobiltelefone (Handy, RePro Produktgruppe 3.10 und Smartphone, RePro Produktgruppe 3.11) 314
5.4.10 Digitalkamera (Foto, RePro Produktgruppe 3.12), Camcorder (RePro Produktgruppe 3.13) 315
5.4.11 LCD Monitore (RePro Produktgruppen 3.14 und 3.15) 316
5.4.12 CRT-Geräte (Monitor, Fernseher, RePro Produktgruppe 3.16) 318
5.4.13 Fernbedienung (RePro Produktgruppe 3.17) 319
5.4.14 DVD-Player (RePro Produktgruppe 3.18) 319
5.4.15 Videospiel tragbar, Videospielkonsole (RePro Produktgruppen 3.19, 3.20) 320
5.4.16 Lautsprecherboxen, Kopfhörer (RePro Produktgruppen 3.22, 3.23) 321

5.4.17 Batteriebetrieben Geräte: Bohrmaschine (RePro Produktgruppe 5.1), Wecker (RePro Produktgruppe 5.2), Rasierapparate (RePro Produktgruppe 5.4) 322
5.4.18 Kaffeemaschinen (RePro Produktgruppe 5.3) 323
5.4.19 Fazit 323
5.4.19.1 Rückgewinnungsverfahren 323
5.4.19.2 Separationsanforderungen (Komponenten, Fraktionen) 324
5.4.19.3 Separationsanforderungen (Geräte) 324
6 Behandlung von RePro-EAG 326
6.1 Analyse der derzeitigen Behandlung von EAG 326
6.2 Prozessbeschreibung 326
6.3 Auswirkungen auf die Separationsrate/Aufkonzentrierung ressourcenrelevanter Metalle 329
6.3.1 I. Aufkonzentrierung durch Vorsortierung und Schadstoffentfrachtung 329
6.3.2 II. Aufkonzentrierung durch Handklaubung 329
6.3.3 III. Aufkonzentrierung durch trockenmechanische Aufbereitung 330
6.3.4 IV. Aufkonzentrierung durch Nasstrennung 330
6.3.5 V. Aufkonzentrierung durch manuelle Demontage 330
6.4 Struktur der Behandlungsanlagen für EAG in Deutschland 331
6.5 Literaturrecherche zu Material- und Stoffflussanalysen der Behandlung von EAG 332
6.6 Behandlungsversuche 337
6.6.1 Versuch 1: Variation der Inputzusammensetzung – Mechanische Behandlung von sortenreinen und gemischten EAG der SG 3 und SG 5 338
6.6.1.1 Versuchsmaterial 339
6.6.1.2 Versuchsdurchführung 340
6.6.1.3 Probenahme und chemische Analyse 344
6.6.1.4 Ergebnisse 345
6.6.1.5 Versuch SG 5 mech. 345
6.6.1.6 Versuch SG 3/SG 5 mech. 347
6.6.1.7 Versuch SG 3 mech. 350
6.6.1.8 Versuch SG 3 mech./man. 352
6.6.1.9 Diskussion 356
6.6.2 Versuch 2: Variation der Aufbereitungstechnik – Mechanische und manuelle Behandlung von schnurgebundenen Festnetztelefonen 359
6.6.2.1 Versuchsmaterial 360

6.6.2.2 Versuchsdurchführung 362
6.6.2.3 Probenahme und chemische Analyse 362
6.6.2.4 Ergebnisse 363
6.6.2.5 Versuch Telefone man. 365
6.6.2.6 Diskussion 366
6.6.3 Versuch 3: Mechanische Separation und Anreicherung von Tantal aus Laptop-Unterteilen 368
6.6.3.1 Versuchsmaterial 368
6.6.3.2 Versuchsdurchführung 370
6.6.3.3 Probenahme und chemische Analysen 389
6.6.3.4 Ergebnisse und Diskussion 390
6.6.4 Versuch 4: Aufbereitung von Feingut aus der mechanischen EAG-Behandlung mit dem Nasstrenntisch 392
6.6.4.1 Versuchsmaterial 393
6.6.4.2 Versuchsdurchführung 393
6.6.4.3 Probenahme und chemische Analyse 397
6.6.4.4 Ergebnisse 399
6.6.4.5 Diskussion 404
6.6.5 Versuch 5: Manuelle Entnahme von Batterien aus EAG der SG 3 und SG 5 und Identifikation von Synergien mit der Entnahme ressourcenrelevanter Komponenten 405
6.6.5.1 Identifizierung und Auswahl der untersuchten Geräte 406
6.6.5.2 Einteilung der ausgewählten Geräte nach Einbausituation der Batterien 407
6.6.5.3 Einbausituation „Klappdeckel“ 407
6.6.5.4 Einbausituation „Schiebeklappe“ 408
6.6.5.5 Einbausituation „Gehäuseschale“ 408
6.6.5.6 Einbausituation „Geclipt“ 409
6.6.5.7 Einbausituation „Verschraubt“ 410
6.6.5.8 Einbausituation „Innenlage“ 410
6.6.5.9 Ablauf der Untersuchungen 411
6.6.5.10 Ergebnisse der Untersuchung 413
6.6.5.11 Fazit und Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Untersuchung 422
6.6.6 Versuchsübergreifende Aspekte und Schlussfolgerungen 423
7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen 427
7.1 Sammlung 428

7.1.1 Systemkomponenten einer optimierten Erfassung in Deutschland 429
7.1.1.1 Gemeinsame Erfassung von Geräten mit hohen und niedrigen Gehalten von RePro-Metallen 429
7.1.1.2 Allgemeine Systemkomponenten der Sammlung 429
7.1.1.3 Ergänzende Komponenten 430
7.1.1.4 Kosten und Verantwortlichkeiten 430
7.1.1.5 Ökonomische Steuerungsinstrumente 430
7.1.1.6 Sammelziele für Elektroaltgeräte 430
7.1.1.7 Monitoring 431
7.1.2 Integrierendes Kommunikationskonzept 432
7.2 Kennzeichnung/ Information 432
7.2.1 Entsorgungsorientierte Kennzeichnung für den Endverbraucher 432
7.2.2 Kennzeichnung für den Erstbehandler 432
7.3 Separation im Rahmen der Erstbehandlung 433
7.3.1 Zielkomponente Leiterplatten 436
7.3.2 Zielkomponente Batterien 437
7.3.3 Leuchtstoffe 438
7.3.4 Optimierung der Rückgewinnung – das Beispiel Neodym 439
7.3.5 Tantal 442
7.3.6 Indium 443
7.3.7 Antimon 444
7.3.8 Recyclingziele 444
7.3.9 Design for Dismantling 444
8 Mengenstrombilanzen der RePro-Metalle 447
8.1 Zielelement Au 447
8.2 Zielelement Ag 448
8.3 Zielelement Palladium 449
8.4 Zielelement Co 450
8.5 Zielelement Ga 451
8.6 Zielement Yttrium 452
8.7 Zielelement Nd 452
8.8 Zielelement In 453
8.9 Zielelement Ta 454
8.10 Zielelement Sn 456
8.11 Zielelement Sb 457

8.12 Fazit der Mengenstrombilanzen 457
9 Quellenverzeichnis 459
10 Anhänge 477
10.1 Anhänge zum Kapitel Lokalisierung, Quantifizierung 478
10.1.1 Metall-Komponenten-Matrix auf Basis der Literaturrecherche 478
10.1.2 Mengen-Konzentrationen-Matrizes 482
10.2 Anhang zum Kapitel Analytik zur Lokalisierung und Quantifizierung 491
10.3 Anhang Abfallpotenzialberechnung - Weibull vs. mittlere Lebensdauer 512
10.4 Schema der Bewertung der Datenqualität bei der Mengenstrombetrachtung 515
10.5 Anhang Daten zur Nutzwertanalyse 517
10.6 Händlersammlung in Europa 525
10.7 Rückgewinnungsverfahren 529
10.7.1 Großtechnische Rückgewinnungsanlagen für post consumer Abfälle 530
10.7.2 Pilot- oder geplante Anlagen, Patente 535
10.7.3 Einsatz von nicht-post-consumer Abfällen 539
10.7.4 Forschung 542
10.7.5 Zusammenfassung 543
10.7.6 Darstellung Einzelverfahren 546
10.7.6.1 Pyrometallurgie zur Rückgewinnung von Metallen der Kupfer- bzw. Bleilinie 546
10.7.6.2 Hydrometallurgie 559
10.8 Anhänge zum Bereich „Kommunikation“ 567

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht RePro-Metalle (orange) im Periodensystem.....44

Abbildung 2: Überblicksdarstellung der Verteilung der Öffnungszeiten (Angaben in % der Annahmestellen; Gesamtzahl: 3.213).....51

Abbildung 3: Rangfolge der Sammelsysteme nach Zielerfüllung in den Oberkriterien 53

Abbildung 4: Status quo der Rückgewinnungstechnik für RePro-Metalle.....54

Abbildung 5: Überblicksdarstellung zur Vorgehensweise im Projekt RePro .77

Abbildung 6: Kritikalität von Rohstoffen: Wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko 82

Abbildung 7: Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung für die Elektrobranche (MaRess-Metalle rot markiert) 89

Abbildung 8: Berechnung des Versorgungsrisikos (MaRess-Metalle rot markiert).....90

Abbildung 9: Berechnung des Versorgungsrisikos, Sensitivität mit Umweltrelevanz 50 % (MaRess-Metalle rot markiert).....91

Abbildung 10: Ergebnis der Ermittlung von wirtschaftlicher Bedeutung (für Elektrogeräte) und Versorgungsrisiko für 22 Metalle 92

Abbildung 11: Übersicht RePro-Metalle (orange) im Periodensystem.....93

Abbildung 12: Anwendungsfelder von Beryllium 94

Abbildung 13: Neodym in Magneten - Anwendungsbereiche der Magnete.101

Abbildung 14: Globale Marktentwicklung für wieder aufladbare Gerätebatterien in Mio. US $, 1991-2009 104

Abbildung 15: SG3 Identifizierung und Protokollierung 156

Abbildung 16: SG5 Sortierfraktionen 157

Abbildung 17: Zusammensetzung der SG3 Container („Andere“ umfasst Gerätearten, die in ihrer Summe jeweils ca. 30 % der Anzahl bzw. des Gewichts ausmachten) 158

Abbildung 18: Zusammensetzung der SG5 Container („Andere“ umfasst Gerätearten, die in ihrer Summe jeweils ca. 30 % der Anzahl bzw. des Gewichts ausmachten) 159

Abbildung 19: Spezifische Elektroaltgeräte-Mengen im Restabfall aus der Systemabfuhr nach verschiedenen Quellen (eigene Zusammenstellung nach verschiedenen Quellen) (L=Landkreis, S=Stadt).....165

Abbildung 20: Verteilung von EAG im Restabfall.....168

Abbildung 21: Beispiele aussortierter EAG 168

Abbildung 22: Überblicksdarstellung der Verteilung der Öffnungszeiten (Angaben in % der Annahmestellen; Gesamtzahl: 3.213) 177

Abbildung 23: Anzahl der Annahmestellen je Zahl geöffneter Tage 178

Abbildung 24: Anteil geöffneter Annahmestellen (exemplarischer Samstag,) in % 179

Abbildung 25: Anteil geöffneter Annahmestellen (exemplarische Mittwoch) in % 179

Abbildung 26: Elektroaltgeräteströme in Italien 2011 183

Abbildung 27: Sammlung von EAG durch Vertreiber in der EU (Stand: 2014); Grün: 1:1-Sammlung + 0:1-Sammlung, Blau: 1:1-Sammlung . 190

Abbildung 28: Sammelbox des Sammelsystems Samlaren für kleine Elektroaltgeräte und Batterien 191

Abbildung 29: Sammelboxen des Örebrö-modellen 193

Abbildung 30: Sammelcontainer des Umeva-modellen 194

Abbildung 31: Skellefteå-Anhänger 195

Abbildung 32: Kerbside system zur Sammlung von kleinen EAG bei der Sperrmüllentsorgung 196

Abbildung 33: Red Box zur Sammlung von kleinen EAG direkt im Haushalt in Schweden 197

Abbildung 34: Sammelbox Jekko 198

Abbildung 35: Sammelmengen SG 3 und 5 im Kreis Höxter 208

Abbildung 36: Sammelmengen über Depotcontainer im Vergleich zur Entfernung zum Wertstoffhof und der Stellplatzdichte 209

Abbildung 37: Abhängigkeit von Entfernung der Abgabestelle und Anzahl der Anlieferungen in % 228

Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Containerdichte und Altglassammelmengen 228

Abbildung 39: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Erreichbarkeit bei Gewichtung 100 % 234

Abbildung 40: Beispiel für eine Sammlung von kleinen EAG im Handel 234

Abbildung 41: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Akzeptanz & Diebstahlrisiko bei Gewichtung 100% 240

Abbildung 42: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Zustand bei Gewichtung 100 % 243

Abbildung 43: Zusammenhang zwischen der Zwischenfahrtzeit, Zwischenfahrtstrecke und Zwischenfahrtgeschwindigkeit eines Mülltransporters 249

Abbildung 44: Ergebnisse der NwA für Oberkriterium Wirtschaftlichkeit & Aufwand bei Gewichtung 100 % 255

Abbildung 45: Rangfolge der Sammelsysteme nach Zielerfüllung in den Oberkriterien 257

Abbildung 46: Gewichtungsvarianten der Oberkriterien und Rangfolge der Sammelsysteme mit Variante „Händlersammlung gesamt“ .. 259

Abbildung 47: Gewichtungsvarianten der Oberkriterien und Rangfolge der Sammelsysteme mit Variante „Händlersammlung > 400 m^2“ 260

Abbildung 48: Steigerung der Erfassungsmengen von RePro-Metallen durch eine optimierte Erfassung 280

Abbildung 49: Prototyp für eine grafische Übersetzung des Aktionsmottos “Deutschland trennt sich“, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 299

Abbildung 50: Methodisches Vorgehen im Projekt RePro bei den Arbeitspaketen Rückgewinnung und Vorbehandlung 302

Abbildung 51: Übersicht Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle 303

Abbildung 52: Metal Wheel: Hauptprozessor der Pyro- und Hydrometallurgie 305

Abbildung 53: Vorgehen zur Ableitung von Behandlungsempfehlungen 307

Abbildung 54: Produktprofil PC (Angaben in mg/Produkt) 307

Abbildung 55: Produktprofil Laptop mit CCFL (Angaben in mg/Produkt) 308

Abbildung 56: Produktprofil Laptop mit LED (Angaben in mg/Produkt) 308

Abbildung 57: Produktprofil Tablet (Angaben in mg/Produkt) 309

Abbildung 58: Produktprofil Festplatten Extern (Angaben in mg/Produkt) .. 310

Abbildung 59: Produktprofil USB Sticks (Angaben in mg/Produkt) 310

Abbildung 60: Produktprofil MP3 Player (Angaben in mg/Produkt) 311

Abbildung 61: Produktprofil Beamer (Angaben in mg/Produkt) 311

Abbildung 62: Produktprofil Multifunktionsdrucker (Angaben in mg/Produkt) 312

Abbildung 63: Produktprofil Telefone (schnurlos) (Angaben in mg/Produkt) 312

Abbildung 64: Produktprofil Navigationsgeräte (Angaben in mg/Produkt) .. 313

Abbildung 65: Produktprofil Handy (Angaben in mg/Produkt) 314

Abbildung 66: Produktprofil Smartphone (Angaben in mg/Produkt) 314

Abbildung 67: Produktprofil Digitalkamera (Foto) (Angaben in mg/Produkt) 315

Abbildung 68: Produktprofil Camcorder (Angaben in mg/Produkt) 315

Abbildung 69: Produktprofil LCD Monitor mit CCFL (Angaben in mg/Produkt) 316

Abbildung 70: Produktprofil LCD Monitor mit LED (Angaben in mg/Produkt) 316
Abbildung 71: Produktprofil LCD Fernseher mit CCFL (Angaben in mg/Produkt) 317
Abbildung 72: Produktprofil LCD Fernseher mit LED (Angaben in mg/Produkt) 317
Abbildung 73: Produktprofil Monitor Röhre (Angaben in mg/Produkt).....318
Abbildung 74: Produktprofil Fernseher Röhre (Angaben in mg/Produkt).....318
Abbildung 75: Produktprofil Fernbedienung (Angaben in mg/Produkt) 319
Abbildung 76: Produktprofil DVD -Player (Angaben in mg/Produkt) 319
Abbildung 77: Produktprofil Videospiel tragbar (Angaben in mg/Produkt) ..320
Abbildung 78: Produktprofil Videospielkonsole (Angaben in mg/Produkt) ..320
Abbildung 79: Produktprofil Lautsprecherboxen (Angaben in mg/Produkt) 321
Abbildung 80: Produktprofil Kopfhörer (Angaben in mg/Produkt) 321
Abbildung 81: Produktprofil Bohrmaschine (Akku) (Angaben in mg/Produkt) 322
Abbildung 82: Produktprofil Wecker (Akku) (Angaben in mg/Produkt).....322
Abbildung 83: Produktprofil Rasierapparat (Akku) (Angaben in mg/Produkt) 322
Abbildung 84: Produktprofil Kaffeemaschine (Angaben in mg/Produkt).....323
Abbildung 85: Prozessbeschreibung der Behandlung von EAG der SG 3 und SG 5.....327
Abbildung 86: Exemplarische Darstellung der Fraktionen aus der Aufbereitung von EAG mit mechanischer Verfahrenstechnik.....328
Abbildung 87: Exemplarische Darstellung der Fraktionen aus der manuellen Zerlegung von EAG mit besonderem Ressourcenpotenzial ...328
Abbildung 88: Versuchskonzept für die mechanische Behandlung von EAG der SG 3 und SG 5 339
Abbildung 89: Zusammenstellung der Versuchsmaterialien aus EAG der SG 3 und SG 5.....340
Abbildung 90: Übersicht der Prozesskette und erzeugten Fraktionen. Es sind nur die Fraktionen dargestellt, die anschließend weiterverarbeitet werden. 341
Abbildung 91: Einzelschritte der Vorzerkleinerung mit anschließender Sortierung. Hauptfraktionen sind das Shreddervormaterial und Kunststoffe. Optional ist eine manuelle Nachsortierung der Kunststoffe möglich, um z. B. Platinen zu entnehmen.....342
Abbildung 92: Einzelschritte der Nachzerkleinerung mit anschließender Sortierung. Es werden bis zu acht verschiedene Fraktionen

erzeugt, die zur direkten Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen oder zur weiteren Aufbereitung vermarktet werden (Tabelle 88).....343

Abbildung 93: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 5 mech.) und Nachzerkleinerung (Shreddervormaterial).....346

Abbildung 94: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 3/SG 5 mech.) und Nachzerkleinerung (Schreddervormaterial).....348

Abbildung 95: Materialflussdiagramm für die Zerkleinerung (SG 3 mech.) und Nachsortierung (K.-M.-G. 8-40 mm).....351

Abbildung 96: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 3 mech.) und Nachzerkleinerung (Schreddervormaterial und Kunststoffe) 353

Abbildung 97: Versuchskonzept für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage von schnurgebundenen Festnetztelefonen.....359

Abbildung 98: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (a).....360

Abbildung 99: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (b) 360

Abbildung 100: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage(c).....361

Abbildung 101: Hörer der schnurgebundenen Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (d) 361

Abbildung 102: Teilung des Versuchsmaterials während der Aufgabe auf ein Förderband (links) und Massenverhältnisse der Teilmengen für die mechanische Aufbereitung und manuelle Demontage (rechts).....362

Abbildung 103: Materialflussdiagramm für die mechanische Aufbereitung von schnurgebundenen Festnetztelefonen 363

Abbildung 104: Materialflussdiagramm für die manuelle Demontage von schnurgebundenen Festnetztelefonen 365

Abbildung 105: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (a)..369

Abbildung 106: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (b)..369

Abbildung 107: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (c)..370

Abbildung 108: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (d)..370

Abbildung 109: Verfahrensschema zur Abtrennung und Anreicherung von Ta-Kondensatoren aus Laptop-Unterteilen (ELPRO GmbH).....371

Abbildung 110: Bruchstück einer Platine nach der Zerkleinerung im Rotorshredder Vorderseite 372

Abbildung 111: Bruchstück einer Platine nach der Zerkleinerung im Rotorshredder Rückseite 372

Abbildung 112: Feingut < 8 mm aus der Zerkleinerung von Laptop-Unterteilen im Rotorshredder 373

Abbildung 113: Feingut < 8 mm aus der Zerkleinerung von Laptop-Unterteilen im Rotorshredder 373

Abbildung 114: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 50 Hz 374

Abbildung 115: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 45 Hz 374

Abbildung 116: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 40 Hz 375

Abbildung 117: Ta-Elkos im Schwergut bei Betriebsfrequenz 40 Hz 375

Abbildung 118: Trommelmagnet mit manueller Aufgabe 376

Abbildung 119: nichtmagnetisierbares Material für die anschließende Wirbelstromscheidung 376

Abbildung 120: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung bei Bandgeschwindigkeiten von 1,8 m/s 377

Abbildung 121: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung bei Bandgeschwindigkeiten von 2,0 m/s 377

Abbildung 122: Materialflussdiagramm der Versuche zur Abtrennung und Anreicherung von Ta-Elkos aus Laptop-Unterteilen (ELPRO GmbH) 378

Abbildung 123: Verfahrensschema zur Anreicherung von Ta-Elkos aus der Schwerfraktion des Zick-Zack-Sichters aus Laptop-Unterteilen (TU Clausthal) 379

Abbildung 124: Ergebnis der horizontalen Siebung des Schwerguts mit einem 8 mm Lochsieb 379

Abbildung 125: Barriere-Wirbelstromscheider zur Abtrennung metallischer Materialien 380

Abbildung 126: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung 381

Abbildung 127: Nichtleitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung 381

Abbildung 128: Dichtetrennung in der Setzmaschine (links). Die Trennung in Leichtgut (rechts oben) und Schwergut (rechts unten) erfolgte an der horizontalen grünen Linie. Einzelne Ta-Elkos im Schwergut sind im linken Bild mit roten Kästchen markiert (links) 382

Abbildung 129: Handmagnet für die Testversuche zur Wirkung von Magnetfeldern auf Ta-Elkos 383

Abbildung 130: Mit Handmagnet im Abstand von 15 cm abgeschiedenes Material. Am rechten Bildrand sind die manuell nachsortierten Ta-Elkos zu sehen 383

Abbildung 131. Mit Handmagnet im Abstand von 5 cm abgeschiedenes Material. Am rechten Bildrand sind die manuell nachsortierten Ta-Elkos zu sehen 383

Abbildung 132: Schwimm-Sink-Trennung mit Diodmethan (CH_2I_2), einzelne Ta-Elkos sind mit roten Kästchen markiert (oben). Manuelles Nachsortieren zeigt, dass Ta-Elkos sowohl ins Leichtgut (links unten) als auch ins Schwergut (rechts unten) gelangen 385

Abbildung 133: Materialflussdiagramm der Versuche zur Anreicherung von Ta-Elkos aus dem Schwergut der Zick-Zack-Sichtung aus Laptop-Unterteilen (TU Clausthal).....386

Abbildung 134: Verfahrensschema zur thermischen Behandlung des Ta-Konzentrats und weiteren Anreicherung (TU Clausthal).....387

Abbildung 135: Ta-Konzentrat nach dem Glühen und Pulverisieren 387

Abbildung 136: Überkorn des Siebschnitts 1 mm.....388

Abbildung 137: Überkorn des Siebschnitts 250 µm.....388

Abbildung 138: Ta-haltiges Pulver < 250 µm 389

Abbildung 139: Verfahrensschema zur Dichtetrennung des Feinguts < 8 mm mit einem Nasstrenntisch.....394

Abbildung 140: Rohhaufwerk, Bandaufgabe mit Grobsieb 50 mm und Vorratsbehälter IBC 1 und IBC 2 für Prozesswasser (von rechts).....395

Abbildung 141: Nasstrenntisch mit Aufgabe des Versuchsmaterials (rechts) und Zugabe von Prozesswasser (Mitte).....395

Abbildung 142: Abnahme der Fraktionen Schwerprodukt (schwer), Zwischenprodukt (zwischen) und Leichtprodukt (leicht) vom Nasstrenntisch 396

Abbildung 143: Schnecke zur Entwässerung des Leichtprodukts mit Ablauf des Prozesswassers durch ein Sieb in die Auffangwanne.....397

Abbildung 144: Entwässerung der Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch und Proben in Haufwerken.....398

Abbildung 145: Schwerprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5.....399

Abbildung 146: Zwischenprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5.....399

Abbildung 147: Leichtprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5 400

Abbildung 148: Schlamm aus dem Versuch mit Feingut der SG 5.....400

Abbildung 149: Materialflussdiagramm für die Separation mit dem Nasstrenntisch (Feingut SG 5) 401

Abbildung 150: Verteilungsmuster der RePro-Metalle über die einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 5)....402
Abbildung 151: Materialflussdiagramm für die Separation mit dem Nasstrenntisch (Feingut SG 3) 403
Abbildung 152: Verteilungsmuster der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 3)....404
Abbildung 153: Darstellung einer typischen Einbausituation „Klappdeckel“..407
Abbildung 154: Darstellung einer typischen Einbausituation „Schiebeklappe“ 408
Abbildung 155: Darstellung einer typischen Einbausituation „Gehäuseschale“ 409
Abbildung 156: Darstellung einer typischen Einbausituation „Geclipt“.....409
Abbildung 157: Darstellung einer typischen Einbausituation „Verschraubt“..410
Abbildung 158: Darstellung einer typischen Einbausituation „Innenlage“ 411
Abbildung 159: Ablauf der Untersuchungen 412
Abbildung 160: Aufteilung der untersuchten Geräte nach Einbausituation ...416
Abbildung 161: Durchschnittliche Zeit zur Entnahme der Batterien je nach Einbausituation....418
Abbildung 162: Aufteilung der entnommenen Batterietypen....418
Abbildung 163: Zerstörungsfreie Entnahme der Zellen bei den Geräten der Untersuchung 421
Abbildung 164: Vorgehen zur Ableitung von Behandlungsempfehlungen.....427
Abbildung 165: Beispiel für die Verklebung von Batterien in einem Tablet....438
Abbildung 166: Nd-Ströme in Deutschland im Jahr 2012 in kg 439
Abbildung 167: Globale Nd-Produktion....440
Abbildung 168: Entwicklung des Abfallpotenzials Nd-haltiger Abfallströme ..441
Abbildung 169: Beispiel eines Designs for Disassembly für die Hauptplatine eines PC, dabei kann die Hauptplatine nach Lösen einer Befestigung aus dem PC ohne weitere Geräteöffnung herausgezogen werden 445
Abbildung 170: Öffnen des PC werkzeugfrei durch Druck auf einen Knopf und werkzeugfreie Entnahme der Festplatte durch Drücken der Befestigungsclips, Demontagezeit: 3-5 Sekunden 445
Abbildung 171: Au-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 448

Abbildung 172: Ag-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 449

Abbildung 173: Pd-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 450

Abbildung 174: Co-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 451

Abbildung 175: Ga-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/ 452

Abbildung 176: Nd-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 453

Abbildung 177: In-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 454

Abbildung 178: Ta-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 456

Abbildung 179: Sn-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a 457

Abbildung 180: Gesamtübersicht der produktbezogenen Quantifizierungen 478

Abbildung 181: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (1/3).....479

Abbildung 182: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (2/3).....480

Abbildung 183: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (3/3).....481

Abbildung 184: Goldkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 482

Abbildung 185: Silberkonzentration in den untersuchten Produkte, aufgetragen über dem Geräteabsatz 483

Abbildung 186: Palladiumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 484

Abbildung 187: Kobaltkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 485

Abbildung 188: Galliumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 486

Abbildung 189: Indiumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 487

Abbildung 190: Zinnkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 488

Abbildung 191: Neodymkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 489

Abbildung 192: Tantalkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz 490

Abbildung 193: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Multifunktionsdrucker 512

Abbildung 194: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Beamer 513

Abbildung 195: Jährliche PV-Installationen in MW(peak) 513

Abbildung 196: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Photovoltaikzellen.....514

Abbildung 197: Vergleichende Ergebnisse zwischen ear-System-Analyse (ear 2012) und RePro-Analyse (ohne Fehlwürfe) (Basis: Gewicht).....515

Abbildung 198: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 60:5:35.....517

Abbildung 199: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 50:10:40.....518

Abbildung 200: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 40:10:50.....519

Abbildung 201: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 35:5:60.....520

Abbildung 202: Prinzipbild eines ISA-Smelters 546

Abbildung 203: Beprobung, Vorbehandlung und Einsatz von Recycling-Materialien bei Aurubis 547

Abbildung 204: Prozesse der AURUBIS am Standort Hamburg 547

Abbildung 205: Stoffströme in der Primärkupferproduktion beim Einsatz von Kupferkonzentraten und Kupferschrotten 548

Abbildung 206: Schematische Darstellung des Recyclingprozesses bei Aurubis.....549

Abbildung 207: Fließbild des Umicore Prozesses (Hagelüken 2006).....551

Abbildung 208: Batterierecycling von Umicore in Olen.....552
Abbildung 209: Das Recycling-Netzwerk von Dowa 553
Abbildung 210: PGM Aufbereitung von gebrauchten Autokatalysatoren.....554
Abbildung 211: Prozess der Akita Zinc Company.....555
Abbildung 212: Recycling-Netzwerk der Dowa-Anlagen mit den jeweiligen Outputströmen.....556
Abbildung 213: Mitsui Kinzoku Recycling Netzwerk.....557
Abbildung 214: Recyclingaktivitäten der JX Nippon Gruppe 558
Abbildung 215: Aufbereitungsschritte des Gasentladungslampenpulvers von Rhodia in Saint Fons 560
Abbildung 216: Schaubild einer idealisierten Flüssig-Flüssig-Extraktion mit Zielsubstanz A.....561
Abbildung 217: Separation von seltenen Erden aus Gasentladungslampen in der Anlage von Rhodia in La Rochelle 561
Abbildung 218: Separation von seltenen Erden in der Anlage von Rhodia in La Rochelle 562
Abbildung 219: Produktion von seltenen Erden aus Gasentladungslampen für Produzenten von Gasentladungslampen in der Anlage von Rhodia in La Rochelle.....562
Abbildung 220: Tantal/Niob-Hydrometallurgie bei H.C. Starck von den Rohstoffen über die Oxide und dasK2TaF7 bis zu den Endprodukten.....564
Abbildung 221: Interne und externe Materialflüsse für Tantal.....565
Abbildung 222: HydroWEEE-Prozessschritte 566
Abbildung 223: Analyse & Kampagnen Umweltprofis Österreich, „Wegwerfen gefährdet unsere Umwelt“, Altstoffsammlung in Österreich 2010, Umweltprofis Österreich, www.ooe-bav.at/start.html567
Abbildung 224: Analyse & Kampagnen Umweltgerechte Entsorgung Wien „Helle Birnen entsorgen richtig 568
Abbildung 225: Analyse & Kampagnen Love Green „love green“, Erste deutschlandweite Medieninitiative zum Thema Nachhaltigkeit, www.love-green.de, 2011 569
Abbildung 226: Mustermotiv Föhn zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 570
Abbildung 227: Mustermotiv Monitor zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 571
Abbildung 228: Mustermotiv Telefon zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 572
Abbildung 229: Mustermotiv Toaster zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 573

Abbildung 230: Mustermotiv Fernseher zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 574

Abbildung 231: Mustermotiv Wäschetrockner zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 575

Abbildung 232: Mustermotiv Lampe zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014 576

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RePro-Geräte 46

Tabelle 2: Überblick über die hochgerechnete Sammelmenge sowie das Abfallpotenzial für RePro-Produkte für das Jahr 2012 48

Tabelle 3: Sammelverpflichtung und Sammelquoten des Handels in europäischen Ländern 52

Tabelle 4: Rückgewinnungsrouten und -konflikte für die RePro-EAG und RePro-Metalle 55

Tabelle 5: Übersicht über die Auswahl kritischer Rohstoffe in den ausgewerteten Studien 80

Tabelle 6: Metallliste als Ausgangspunkt für die Auswahl der ressourcenrelevanten Metalle 80

Tabelle 7: Gewichtung der Auswahlkriterien zur wirtschaftlichen Bedeutung 87

Tabelle 8: Gewichtung der Auswahlkriterien zum Versorgungsrisiko 87

Tabelle 9: Ausgewählte ressourcenrelevante Metalle (RePro-Metalle) ... 93

Tabelle 10: Berylliumkonzentrationen in verschiedenen Legierungen 94

Tabelle 11: Anteil von Antimon in verschiedenen Arten von Elektronikgerätekategorien in Gew.-% 96

Tabelle 12: Konzentrationen von Antimon in LED (Anteil von Antimon in verschiedenen Arten von Elektronikgerätekategorien, (in mg/kg) 96

Tabelle 13: Anwendungsbereiche von Gold in Elektrobauteilen 99

Tabelle 14: Metall-Komponenten-Matrix 102

Tabelle 15: Komponenten-Produkt-Matrix 106

Tabelle 16: Einschätzung der Datenlage zu den Metallgehalten der 30 ausgewählten Produkte 109

Tabelle 17: Ausgewählte Geräte, ressourcenrelevante Bauteile und die analysierten Metalle 112

Tabelle 18: Geräteliste und Hersteller 112

Tabelle 19: Dokumentation der untersuchten Geräte (Bildquelle: Ökopol GmbH) 113

Tabelle 20: Aufschlussmethoden 114

Tabelle 21: Messstrategie für die verschiedenen Geräte und Bauteile 115

Tabelle 22: RePro-Metalle in Bauteilen ausgewählter Elektroaltgeräte ... 116

Tabelle 23: Zusammenfassung der Mittelwerte: Ressourcenrelevante Metalle in Bauteilen ausgewählter Elektroaltgeräte 117

Tabelle 24: Produktgewicht und Marktvolumen der ausgewählten Elektrogeräte und ressourcenrelevanten Metalle 120

Tabelle 25: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Gold (Ergebnisse eigener Analysen mit * versehen) 124

Tabelle 26: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Silber (Ergebnisse eigener Analysen mit * versehen) 126

Tabelle 27: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Palladium.....128

Tabelle 28: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Kobalt 129

Tabelle 29: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Gallium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt).....131

Tabelle 30: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Indium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt).....133

Tabelle 31: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Zinn (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt) 135

Tabelle 32: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Neodym (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt).....136

Tabelle 33: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Yttrium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt).....138

Tabelle 34: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Seltene Erden in Neodym-Eisen-Bor-Magneten (Mengenanteile nach Oakdene Hollins (2010)) 140

Tabelle 35: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Seltene Erden in Leuchtstoffen (Mengenanteile der USGS 2011) 141

Tabelle 36: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Tantal (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt) 141

Tabelle 37: Gesamt KEA-Werte pro Produktart (beispielhafte Auswahl) .147

Tabelle 38: Rechercheergebnisse zur Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit der ausgewählten Produkte 148

Tabelle 39: Berechnetes Abfallpotenzial in Deutschland der Jahre 2012 und 2020 153

Tabelle 40: Vergleichende Ergebnisse zwischen ear-System-Analyse (ear 2012) und RePro-Analyse (ohne Fehlwürfe) (Basis: Gewicht)159

Tabelle 41: Größenkategorisierung der RePro-Geräte 161

Tabelle 42: Überblick über die hochgerechnete Sammelmenge sowie das Abfallpotenzial für RePro-Produkte für das Jahr 2012.....163

Tabelle 43: Spezifische Menge EAG im Restabfall (kg/E*a) 166

Tabelle 44: Spezifische Menge EAG in der Gelben Tonne (kg/E*a) 166

Tabelle 45: Sammelverpflichtung und -quoten des Handels in andern europäischen Ländern 188

Tabelle 46: Überblicksdarstellung zur Sammlung von EAG über Depotcontainer (DC); Stand 03.2015 soweit nicht anders angegeben 200

Tabelle 47: Beispielrechnung zu Kosten der Sammlung über Depotcontainer (DC), Szenario: Depotcontainer werden in einen Sammel-LKW entleert 210

Tabelle 48: Bewertungs- und Vergleichskriterien für die Nutzwertanalyse 215

Tabelle 49: Bewertungsschema Paarvergleich 218

Tabelle 50: Gewichtung durch Paarvergleich 219

Tabelle 51: Zeitliche Verfügbarkeit der Systeme pro Woche und Zielerreichungsfaktor Zf_n 223

Tabelle 52: Bewertungsschema für Ermittlung des Zielerfüllungsgrades für Kriterien, für keine kardinalskalierten Daten verfügbar waren 224

Tabelle 53: Bewertung des Unterkriteriums Zeitliche Verfügbarkeit (Wochenstunden) der Systeme 227

Tabelle 54: Schätzung des HDE bzgl. der Anzahl der in Deutschland von der 0:1-Rücknahme gemäß WEEE-II-RL betroffenen Handelsgeschäften 230

Tabelle 55: Bewertung des Unterkriteriums Lage/zurückzulegende Wege (km) 232

Tabelle 56: Bewertung des Unterkriteriums Lokalisierungsaufwand 233

Tabelle 57: Bewertung des Unterkriteriums Erfassung verschiedener Altgerätearten 235

Tabelle 58: Bewertung des Unterkriteriums Transparenz über Verbleib . 236

Tabelle 59: Bewertung des Unterkriteriums Datenschutz 237

Tabelle 60: Bewertung des Unterkriteriums Vermüllung des Standorts .. 238

Tabelle 61: Bewertung des Unterkriteriums Diebstahlrisiko 239

Tabelle 62: Bewertung des Unterkriteriums Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung 241

Tabelle 63: Bewertung des Unterkriteriums Fehlwurfquote 242

Tabelle 64: Bewertung des Unterkriteriums Kosten für Anschaffung 244

Tabelle 65: Bewertung des Unterkriteriums Flächenverfügbarkeit 246

Tabelle 66: Bewertung des Unterkriteriums Rechtlicher Aufwand 247

Tabelle 67: Sammelzeit und Behälteranzahl pro Tonne je Sammelsystem 251

Tabelle 68: Bewertung des Unterkriteriums Personal (€) 254

Tabelle 69: Bewertung des Unterkriteriums Fläche (€) 254

Tabelle 70: Bewertung des Unterkriteriums Sortierung (€).....255
Tabelle 71: Durchschnittliche Zielerfüllungsgrade, Mittelwerte und Standardabweichungen der Sammelsysteme 261
Tabelle 72: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Depotcontainer 262
Tabelle 73: Mittelwertabweichung der Kriterien bei EAG-Tonne.....263
Tabelle 74: Mittelwertabweichung der Kriterien bei „Händlersammlung gesamt“/ “Händlersammlung > 400 m2“ 264
Tabelle 75: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Wertstoffmobil.....265
Tabelle 76: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Wertstoffhof.....267
Tabelle 77: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude 268
Tabelle 78: Varianten der Pfandhöhe für Mobiltelefone.....272
Tabelle 79 Anforderungsprofil für Kommunikationskampagne 285
Tabelle 80 Haushaltsgroßgeräte: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften 287
Tabelle 81 Haushaltskleingeräte: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften 289
Tabelle 82 Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften.....291
Tabelle 83 Geräte der Unterhaltungselektronik: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften 293
Tabelle 84: Überblick über Separationsmöglichkeiten für RePro-Metalle.....305
Tabelle 85: Literaturübersicht großtechnischer Versuche zur Aufbereitung von EAG mit Angabe des Bezugsjahres der Daten, der untersuchten Gerätetypen, der verwendeten Verfahren bzw. Anlagen und der einzelnen Prozessschritte 332
Tabelle 86: Literaturübersicht großtechnischer Versuche zur Aufbereitung von EAG mit Angabe der analysierten Material- und Stoffflüsse. Dargestellt ist nur ein Vergleich mit den RePro- Metallen, in einigen Fällen wurden weitere Schad- und Wertstoffe analysiert 335
Tabelle 87: Ergebnisse der Sortierung und Entfrachtung von SG 5 und SG 3.....339
Tabelle 88: Verbleib der Fraktionen aus der Nachzerkleinerung und Sortierung in nachfolgenden Prozessen.....343
Tabelle 89: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 5 mech.), < BG: unterhalb der Bestimmungsgrenze 346
Tabelle 90: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 5 mech.) ...347

Tabelle 91: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3/SG 5 mech.) 348

Tabelle 92: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 3/SG 5 mech.) 350

Tabelle 93: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech.) 351

Tabelle 94: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 3 mech.) ...352

Tabelle 95: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Vorzerkleinerung....353

Tabelle 96 Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Nachzerkleinerung des Schreddervormaterials 354

Tabelle 97 Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Nachzerkleinerung der Kunststoffe 354

Tabelle 98: Konzentrationen der RePro-Metalle nach Vorzerkleinerung des Inputs (SG 3 mech./man.)....355

Tabelle 99 Konzentrationen der RePro-Metalle nach Nachzerkleinerung des Schreddervormaterials (SG 3 mech./man.) 356

Tabelle 100 Konzentrationen der RePro-Metalle nach Nachzerkleinerung der Kunststofffraktion (SG 3 mech./man.) 356

Tabelle 101: Konzentrationen im Input der verschiedenen Versuche mit EAG der SG 3 und SG 5 (Angaben in mg/kg) 357

Tabelle 102: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für die verschiedenen Versuche mit EAG der SG 3 und SG 5, angegeben sind die Massenanteile (%) der RePro-Metalle 358

Tabelle 103: Transferkoeffizienten (%) der ressourcenrelevanten Metalle und deren absolute Massen (Telefone mech.)....364

Tabelle 104: Konzentrationen (mg/kg) der ressourcenrelevanten Metalle (Telefone mech.)....364

Tabelle 105: Transferkoeffizienten (%) der ressourcenrelevanten Metalle und deren absolute Massen (Telefone man.) 365

Tabelle 106: Konzentrationen (mg/kg) der ressourcenrelevanten Metalle (Telefone man.) 366

Tabelle 107: Konzentrationen (mg/kg) im Input der beiden Versuche mit schnurgebundenen Festnetztelefonen 366

Tabelle 108: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für den Versuch „Telefone mechanisch“ mit schnurgebundenen Festnetztelefonen 367

Tabelle 109: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für den Versuch „Telefone manuell“ mit schnurgebundenen Festnetztelefonen 367

Tabelle 110: Übersicht der Probenahmen und chemischen Analysen 389

Tabelle 111: Ergebnisse der chemischen Analysen und Vergleich mit Referenzwerten, Angabe der Konzentrationen in ppm 392

Tabelle 112: Übersicht der Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch, Wägungen und Probenahmen 398

Tabelle 113: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 5).....401

Tabelle 114: Konzentrationen (mg(kg) der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 3).....403

Tabelle 115: Erstellte "Fahndungsliste" für Versuch 5 „Synergie der Batterieseparation“ 406

Tabelle 116: Liste der untersuchten Altgeräte.....413

Tabelle 117: Geräte und Bauformen der entnommenen Lithium-Ionen-Zellen 419

Tabelle 118: Empfehlungen zur Vorseparation von RePro-Geräten beim Eingang Erstbehandler (ohne Berücksichtigung der Notwendigkeit der Batterieentnahme).....434

Tabelle 119: Tendenzen der Entwicklung des Abfallpotenzials Nd-haltiger Abfallströme 441

Tabelle 120: Untersuchte Geräte (Quelle der Bilder: Ökopol GmbH) 491

Tabelle 121: Gewichtung der Kriterien „Erreichbarkeit“, Akzeptanz“ und „Diebstahlrisiko“ mittels Paarvergleich.....521

Tabelle 122: Gewichtung des Kriteriums „Zustand“ mittels Paarvergleich 523

Tabelle 123: Gewichtung des Kriteriums “Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ mittels Paarvergleich.....524

Tabelle 124: Überblick Umsetzung Händlerrücknahme in Europa 525

Tabelle 125: Rückgewinnungsanlagen die ebenfalls eine Vorbehandlung durchführen.....529

Tabelle 126: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente aus post consumer Abfällen.....530

Tabelle 127: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für RePro-Metalle im Pilotmaßstab, als geplante Anlagen oder als patentgeschützte Verfahren.....535

Tabelle 128: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente aus nicht-post consumer Abfällen 539

Tabelle 129: Liste der dokumentierten Forschungen zur Rückgewinnung vonRePro-Metalle.....542

Tabelle 130: Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente im Überblick.....544

Abkürzungsverzeichnis

ABS	
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Agentur für Umwelt- und Energie
AG	Arbeitsgruppe
AP	Arbeitspaket
BattG	Batteriegesetz, Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren
BGBl	Bundesgesetzblatt
BHB	Bundesverband Deutscher Heimwerker-, Bau- und Gartenfachmärkte e. V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt und Bau
bzgl	bezüglich
CD	Compact Disc,
CLP	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung
CPT	Cordless Power Tools, Kabelloses Elektrisches Werkzeug
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DG	Generaldirektion

DLR	
DOI	Digital Object Identifier System, Digitales Objektidentifikationssystem
DPG	Deutsche Pfandsystem GmbH
DV	Datenverarbeitung
EAG	Elektro- und Elektronikaltgeräte
EAK	Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH
ear	stiftung elektroaltgeräteregister
EC	Europäische Kommission
EDRFA	energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse
EEG	Elektro- und Elektronikgeräte
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Schweiz)
EU	Europäische Union
EW	EinwohnerInnen
FB	Fachbereich
FKZ	Forschungskennzeichen
GDMB	Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute e.V.
ggü	gegenüber

HIV	Humane Immundefizienz-Virus
Hrsg	Herausgeber
HSR	Hochschule für Technik Rapperswil (Schweiz)
HU	Ungarn
i.d.R	in der Regel
i.V.g.M.	in Verkehr gebrachte Menge
ICP	Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma
idF	in der Fassung
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
In	Indium
inkl.	inklusive
IT	Informationstechnik
IT&UE	Informationstechnik und Unterhaltungselektronik
ITK	Informationstechnik und Kommunikationstechnik
ITO	Indiumzinnoxid
J	Joule
JP	Japan
JRC	Jint Research Centre
k. A.	keine Angabe
KEA	kumulierter Energieaufwand
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
Kom	Europäische Kommission
KW	Kalenderwoche
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LAP	Lanthanphosphat
LCD	Liquid Christal Display, Flüssigkristallbildschirm
LCM	Less Common Metals, wenig gebräuchliche Metalle
LED	Light Emitting Diode, Licht emittierende Diode
Lfd	Laufend
LIB	Lithium Ionen Batterie
Li-Ion	Lithium Ionen
LKW	Lastkraftwagen
LN	laufende Nummer

LP	Leiterplatte
Ltd	Limited, Gesellschaftsform im Vereinigten Königreich
MFA	Materialflussanalyse
mg/TV	mg pro Fernsehgerät
MGB	Müllgroßbehälter
MHB	Müllhandbuch
MIBK	Methylisobutylketon
MLCC	Multi Layer Ceramic Capacitor, Keramischer Mehrschichtkatalysator
MRT	Magnetresonanztomographie
MuA	Müll und Abfall
N. N.	nicht benannt
NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
Nd	Neodym
NdFeB	Neodym Eisen Bor (Magnet)
NiMH	Nickel-Metallhydrid
Nr	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
NwA	Nutzwertanalyse
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OÖ	Oberösterreich
OPT	hier: optimiert
örE	öffentlich rechtliche Entsorgungsträger
OVAM	Public Waste Agency of Flanders, Flämische Abfallwirtschaftsagentur
PA	Polyacryl
PC	Polycarbonat
PC	Personalcomputer
PC/TV	Personalcomputer/Fernsehgerät
PCB	Polychlorierte Biphenyle
Pd	Palladium
PGM	Platinum Group Metals, Elemente der Gruppen 8 bis 10 der 5. Periode und der 6. Periode
PK	Produktkategorie
PKW	Personenkraftwagen
ppm	parts per million, Teile je Millionen
PRO	Producer Responsibility Organisation

PS	Polystyrol
PWB	Printed Wiring Board, Leiterplatte
REACH	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 ist eine EU-Chemikalienverordnung
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RL	Richtlinie
RoHS	EU-Richtlinie 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
Sb	Antimon
SFA	Stoffflussanalyse
SG	Sammelgruppe
SLRS	Stiftung der Leuchtmittelhersteller
Sn	Zinn
SSD	Solid State Disc, Festplatte
Std	Stunde
Stk	Stück
STMUG	Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege
STOT	Single Target Organ Toxicity, Spezifische Zielorgan-Toxizität
Ta	Tantal
TBP	Tributylphosphat
TU	Technische Universität
TV	Television, Fernsehgerät
Tz	Teilziffer
UBA	Umweltbundesamt
UE	Unterhaltungselektronik
UHT	Ultra High Temperatur, Ultrahochtemperatur
UK	United Kingdom, Vereinigtes Königreich
UN	United Nations, Vereinte Nationen
UNEP	United Nations Environmental Programm, Umweltprogramm der Vereinten Nationen
URL	Uniform Resource Locator, "Internetadresse"
US	Vereinigte Staaten von Amerika (Kurzform im Zusammenhang mit Einheiten wie z. B. US-Dollar
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
USB	Universal Serial Bus, Serielle Standardschnittstelle
usw	und so weiter

vgl	vergleiche
vs	versus
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment, Elektro- und Elektronik-Altgeräte
wg	wegen
WGI	Worldwide Governance Indikators, Weltweite Governance Indikatoren
WS-Hof	Wertstoffhof
Y	Yttrium
Yox	Yttriumoxid
z. T.	zum Teil
Zf	Zielerreichungsfaktor
ZG	Zielgruppe
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie

Zusammenfassung

Ziele, Hintergründe und Vorgehensweise

Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft sind bedeutende volkswirtschaftliche und ökologische Ziele, die einer technologischen und organisatorischen Ausgestaltung bedürfen. Ein großer volkswirtschaftlicher Wert liegt in Edel- und Sondermetallen sowie Metallen der Seltenen Erden, für die mittelfristig Konzepte der Kreislaufführung geschaffen werden müssen. Die Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen und Seltenen Erden aus Abfällen privater Haushalte nimmt dabei eine Schlüsselposition ein.

Viele in geringen Mengen je Elektro- und Elektronikgerät eingesetzte Metalle wie z. B. Edel- und Sondermetalle und Seltene Erden sind auch wegen der hohen spezifischen Umweltbelastungen, die bei ihrer Gewinnung entstehen, ressourcenrelevant. Hinzu kommen oftmals begrenzte Reserven und eine geringere Konzentration der Metalle in neu zu erschließenden Vorkommen. Weiterhin ist das Recycling dieser Metalle durch den dissipativen Einsatz in den Produkten erschwert – in vielen Fällen findet deshalb keine oder nur eine unzureichende Kreislaufführung statt. Dadurch können Primärrohstoffe nicht durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden.

Signifikante Anteile der Weltproduktion der als umweltrelevant und/oder kritisch identifizierten Metalle sind wichtig für Technologieentwicklungspfade bzw. Zukunftstechnologien und für Anwendungen, für die eine steigende Nachfrage prognostiziert wird.

Um die derzeitige und zukünftige Nachfrage nicht rein aus Primärmetallen mit ihren teilweise hohen Umweltlasten decken zu müssen, ist die Kreislaufführung der Metalle notwendig. Hierdurch werden nicht nur Primärrohstoffe geschont, sondern es wird aufgrund der i.d.R. geringeren Umweltbelastungen der Kreislaufführung auch zur Schonung von Natur- und Umweltressourcen beigetragen.

Das wachsende Ressourcenpotenzial der Metalle in Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) zur Produktion von Sekundärmetallen wird gegenwärtig noch nicht optimal erschlossen, wie u. a. die in Deutschland erreichten Sammelquoten und verschiedene Studien zur Rückgewinnungsquote zeigen. Daher sollte das Konzept der Sammlung, Behandlung und Verwertung von Elektroaltgeräten weiterentwickelt werden.

Das Hauptziel des durchgeführten Projektes war daher die Entwicklung zielgerichteter Maßnahmen und Instrumente zur besseren Nutzung bisher nicht ausgeschöpfter Potenziale zur Kreislaufführung von umwelt- und ressourcenrelevanten Metallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten.

Der Projektbericht umfasst die folgenden Arbeitsbereiche:

- Auf der Basis einer Kritikalitätsanalyse wurden die mit Blick auf die Ressourcenschonung relevanten Metalle in Elektro- und Elektronikgeräten (=RePro-Metalle) identifiziert (siehe Kapitel 2).
- Im nächsten Schritt erfolgte eine Bestimmung der Elektro- und Elektronikprodukte, in denen relevante Mengen der ausgewählten RePro-Metalle vorkommen (=RePro-Produkte) und eine Mengenstrombetrachtung für RePro-Metalle in RePro-Produkten mit einer Identifizierung von Verlusten und Potenzialen (siehe Kapitel 3).
- Anschließend wurde die Sammlung von EAG analysiert und bewertet (Kapitel 4).

- Um die Sammlung von EAG zu optimieren war unter anderem auch eine Motivation der Letztnutzer zur umweltgerechten Entsorgung notwendig. Das Kommunikationskonzept, das in Kapitel 4.7 dargestellt wird, kann hierzu einen Beitrag leisten.
- Die Rückgewinnungsprozesse von RePro-Metallen aus RePro-Produkten werden in Kapitel 5 analysiert.
- Anschließend wird die Vorbehandlung von RePro-EAG analysiert und bewertet und es werden Ergebnisse von Versuchen zur Optimierung der Behandlung dargestellt (Kapitel 6).
- Die genannten Schritte bildeten die Basis zur Entwicklung, Bewertung und Abwägung von Maßnahmen und Instrumenten zur optimierten Steuerung, Erfassung und Behandlung von EAG und der Rückgewinnung der enthaltenen ressourcenrelevanten Metalle (siehe Kapitel 7).
- Abschließend wurden zur Verdeutlichung der Ressourcenpotenziale drei unterschiedliche Szenarien der Sammlung, Erfassung und Behandlung von Elektroaltgeräten betrachtet und auf der Basis der in diesem Vorhaben durchgeführten Quantifizierungen elementspezifische Mengenstrombilanzen errechnet (Kapitel 8).

Der Fokus der Untersuchung lag auf den EAG aus privaten Haushalten im Sinne des § 3 ElektroG.

Alle Untersuchungen und Darstellungen beziehen sich auf die Situation vor Umsetzung des neuen ElektroG im Jahr 2015. Dementsprechend beziehen sich auch Definitionen wie z. B. die Sammelgruppen auf den Stand vor dem ElektroG des Jahres 2015.

Auswahl ressourcenrelevanter Metalle

Ziel dieses Arbeitsschrittes war die Identifizierung ressourcenrelevanter Metalle in Elektro- und Elektronikprodukten. Darunter werden Metalle verstanden, die sowohl eine hohe wirtschaftliche Bedeutung für die Elektro- und Elektronikindustrie als auch ein hohes Versorgungsrisiko aufweisen.

Als Ausgangsbasis wurde eine Metallliste zusammengestellt, aus der anschließend die „ressourcenrelevanten“ Metalle für das Vorhaben ausgewählt wurden. Einige Metalle wurden von der weiteren Betrachtung ausgenommen. Dies betraf

- Quecksilber (Hg), welches in der europäischen Quecksilberstrategie behandelt wird,
- Lithium, welches vom Fraunhofer-Institut ISI intensiv untersucht und als nicht kritisch erachtet wurde (Angerer et al., 2009a) und
- Magnesium, welches in Elektrogeräten im Vergleich zu anderen Anwendungsgebieten nicht mengenrelevant bedeutsam ist.

Der Begriff „Ressourcenrelevanz“ unterliegt keiner abschließenden Definition, sondern bezeichnet strategische Überlegungen der Ressourcensicherung, die für das vorliegende Vorhaben getroffen wurden. Für die Auswahl der strategisch wichtigen Metalle wurde das Konzept der Rohstoffkritikalitätsmatrix nach Erdmann und Graedel (2011) angewendet. Nach dieser Matrix setzt sich die Kritikalität eines Rohstoffs, definiert als die

Unsicherheit über die Stabilität der gegenwärtigen oder zukünftigen Rohstoffversorgung, aus der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffs und dem Versorgungsrisiko bzw. der Verfügbarkeit eines Rohstoffs zusammen. Je höher das Versorgungsrisiko und je höher seine wirtschaftliche Bedeutung ist, umso kritischer wird die Versorgungslage des Rohstoffs.

Als Ergebnis des Auswahlverfahrens entstand eine Liste von Metallen (siehe Abbildung 1), die im Folgenden als RePro-Metalle bezeichneten werden. Stellvertretend für die 17 Metalle der Seltenen Erden wurden Neodym und Yttrium ausgewählt.

Abbildung 1: Übersicht RePro-Metalle (orange) im Periodensystem

Wasser-stoff																Helium
Lithium	Beryllium										Bor	Kohlenstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Fluor	Neon
Natrium	Magne-sium										Alumi-nium	Silizium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon
Kalium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Kobalt	Nickel	Kupfer	Zink	Gallium	Germa-nium	Arsen	Selen	Brom	Krypton
Rubi-dium	Stron-tium	Yttrium	Zirconium	Niob	Molyb-dän	Techne-tium	Ruthe-nium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium	Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Jod	Xenon
Caesium	Barium	Lutetium	Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksil-ber	Thallium	Blei	Wismut	Polonium	Astat	Radon
Francium	Radium	Lawren-cium	Ru-therfordium	Dubnium	Seabor-gium	Bohrium	Hassium	Meitne-rium	Darmstad-tium	Ro-entgenium	Coperni-cium	Unun-trium	Unun-quadium	Ununpen-tium	Unun-hexium	Ununsep-tium	Ununoc-tium
		Lanthan	Cer	Praseo-dym	Neodym	Prome-thium	Sama-rium	Euro-pium	Gadoli-nium	Terbium	Dyspro-sium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium		
		Actinium	Thorium	Protacti-nium	Uran	Neptu-nium	Pluto-nium	Ameri-cium	Curium	Berkelium	Califor-nium	Einstei-nium	Fermium	Mendele-vium	Nobelium		

* Lanthanide

** Actinide

Quelle: eigene Darstellung

Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen

Zur Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen in 30 auszuwählenden Elektro- und Elektronikgeräten wurde zunächst die Verwendung der RePro-Metalle in Elektro(nik)geräten auf der Komponentenebene lokalisiert (Metall-Komponenten-Matrix). Anschließend erfolgte eine Zuordnung von Komponenten zu Produkten (Komponenten-Produkt-Matrix). Anhand der Matrix erfolgte eine Auswahl von 30 Elektronikgeräten, die für die Zielstellung dieses Projektes besonders relevant waren (= RePro-Geräte). Die Quantifizierung der RePro-Metalle in den RePro-Geräten erfolgte über Marktuntersuchungen zu den in Verkehr gebrachten Mengen und der Bestimmung des Abfallpotenzials sowie der Entsorgungswege. Folgende Kriterien waren für die Auswahl der in Tabelle 15 aufgelisteten 30 RePro-Geräte ausschlaggebend:

- Geräte der Sammelgruppen 3, 4 und 5 des ElektroG,[1]
- Fokus auf dem zukünftigen Altgeräteaufkommen, so dass auch neuartige Anwendungen berücksichtigt wurden, die derzeit nicht als Elektroaltgerät vorliegen (z. B. Tablet Computer),
- Stellvertreterprodukte: da einige Komponenten, wie z. B. Akkumulatoren, in diversen Produkten eingesetzt werden, sind einzelne stellvertretende Produkte ausgewählt worden,

[1] Sammelgruppe 3: Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik; Sammelgruppe 4: Gasentladungslampen; Sammelgruppe 5: Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente.

- Absolute Menge: neben der Menge der eingesetzten Metalle pro Produkt sind auch Abschätzungen der absolut auf den Markt gebrachten Metallmengen in die Auswahl eingeflossen,
- Abgrenzung zu weiteren Forschungsprojekten: Produkte, die zwar teilweise erhebliche Mengen der RePro-Metalle enthalten (z. B. Gasentladungslampen, Photovoltaikmodule) wurden nicht behandelt, da die jeweiligen Produkte und ihre Mengenströme bereits in anderen Projekten behandelt wurden (Sander et al. 2015, Sander et al 2016).

Tabelle 1: RePro-Geräte

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung
Geräte der SG 3 (Informations-, Telekommunikationsgeräte, Unterhaltungselektronik)	3.1	PC
	3.2	Laptop
	3.3	Tablet Computer
	3.4	Externe Festplatten
	3.5	USB Stick
	3.6	Beamer
	3.7	Multifunktionsdrucker, Scanner, Laserdrucker
	3.8	Schnurloses Heimtelefon
	3.9	Navigationsgerät
	3.10	Handy
	3.11	Smartphone
	3.12	Digitalkamera
	3.13	Camcorder/Videokamera
	3.14	LCD Monitor
	3.15	LCD Fernseher
	3.16	CRT Geräte
	3.17	Fernbedienung
	3.18	DVD Spieler
	3.19	Tragbare Videospiele
	3.20	Videospielkonsolen
	3.21	MP3 Player
	3.22	Lautsprecher
	3.23	Kopfhörer
Geräte der SG 4 (Gasentladungslampen)	4.1	Energiesparlampen
	4.2	LED Lampen
	4.3	Leuchtstoffröhren
Geräte der SG 5 (Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente)	5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben
	5.2	Wecker, batteriegetrieben
	5.3	Kaffeemaschine
	5.4	Rasierapparat

Für die ausgewählten 30 RePro-Geräte wurden die Mengen der enthaltenen RePro-Metalle recherchiert. Um festgestellte Datenlücken der Literaturauswertungen zumindest mit Orientierungswerten füllen zu können, wurden 30 Geräte chemisch analysiert.

Die recherchierten und empirisch gewonnenen Daten zu Metallgehalten und die im Rahmen der Marktanalyse gewonnenen Daten zu Produktmengen und -gewichten wurden in einem anschließenden Arbeitsschritt zusammengeführt. Wesentliche Potenziale von RePro-Metallen wurden in folgenden Gerätearten identifiziert:

- **Gold:** MP3 Player, Handys, Digitalkameras,[2]
- **Silber:** MP3 Player, Navigationsgeräte, Kommunikationsgeräte (Handy, Smartphone, schnurloses Heimtelefon), DVD-Player,
- **Palladium:** MP3 Player, Navigationsgeräte, Kommunikationsgeräte (Handy, Smartphone, schnurloses Heimtelefon), Camcorder und Digitalkameras,
- **Kobalt:** komplexe transportable Elektronikprodukte, Werkzeuge, Smartphones und Handys,
- **Gallium:** Handys, Digitalkameras, Fernbedienungen,
- **Indium:** Flachbildschirme, Handys, Tablet Computer, tragbare Videospielgeräte,
- **Zinn:** Videospielgeräte, Vielzahl weiterer Produkte,
- **Neodym:** Akustikanwendungen (Kopfhörer, Lautsprecher), externe Festplatten,
- **Yttrium:** Monitore und Fernseher mit CCFL-Technologien, Energiesparlampen,
- **Tantal:** Digitalkameras, Camcorder, Laptops, Handys.

Altgerätepotenzial

Die potenziellen Abfallmengen (Abfallpotenzial) in Deutschland für die 30 RePro-Geräte wurden für die Jahre 2012 (Jahr der Sortieranalyse siehe unten) und 2020 in Anlehnung an die Methode „Einfache Verzögerung“ (Chancerel 2010, Wang 2013) bestimmt.

In einer Sortieranalyse für Altgeräte der Sammelgruppen 3 und 5 wurden Primärdaten zu den real in den Erstbehandlungsanlagen ankommenden Altgerätearten und -mengen erhoben. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden mit Daten aus weiteren Entsorgungseinrichtungen abgeglichen und evaluiert. Auf dieser Basis wurde eine theoretische Sammelquoten für RePro-Geräte bestimmt, indem die ermittelten Mengen der erfassten RePro-EAG ins Verhältnis zum Abfallpotenzial gesetzt wurden (siehe Tabelle 2).

- Der geringe Anteil der nicht-erfassten PC kann ggf. dadurch bedingt sein, dass nur die PC des privaten Gebrauchs (Consumer Market laut CEMIX) zur Berechnung des Abfallpotenzials herangezogen wurden, ggf. aber auch PC aus dem Geschäftsbereich in die Sammlung der örE kommen. Würden die PC aus dem Geschäftsbereich vollständig berücksichtigt, läge der Anteil der nicht gesammelten Geräte bei ca. 70 %.
- Der negative Wert bezüglich des Anteils nicht gesammelter Geräte für Lautsprecherboxen kann durch einen schnelleren Produktaustausch bei den Nutzern aufgrund des Technologiewandels (Aktivboxen) bedingt sein.
- Die sehr niedrigen Erfassungswerte für Laptops, Tablets, Smartphones, Handys, Camcorder bzw. Digitalkameras und Navigationsgeräte stimmen mit den Aussagen der Erstbehandler überein, dass solche sehr werthaltigen Gerätearten nur selten in den Anlieferungen zu finden seien.
- Bei USB Sticks und MP3 Playern wird vermutet, dass sie aufgrund der geringen Größe besonders häufig in andere Abfallströme gelangen.

[2] Für USB Sticks ergeben die Angaben einen Goldgehalt von bis zu 1,48 %, hierbei sei aber auf die beschriebenen Datenuntersicherheiten verwiesen.

Tabelle 2: Überblick über die hochgerechnete Sammelmenge sowie das Abfallpotenzial für RePro-Produkte für das Jahr 2012

Re-Pro Nr	Altprodukt	Gesammelt (Hochrechnung) (Stück/a)	Abfallpotenzial (Stück/a)	Anteil nicht gesammelt (%)
3.1	PC	1.563.085	1.790.000	13 %
3.2	Laptops, Notebooks	166.066	1.945.000	91 %
3.3	Tablet Computer	0	50.000	100 %
3.4	Festplatte Extern	21.351	17.884.000	100 %
3.5	USB Sticks	4.744	12.999.000	100 %
3.6	Projektoren (Beamer)	80.764	200.000	60 %
3.7	Multifunktionsdrucker	408.329	2.360.000	83 %
3.8	Telefone	1.259.490	5.718.760	78 %
3.9	Navigationsgeräte	9.487	2.160.000	100 %
3.10	Handy	208.719	20.740.000	99 %
3.11	Smartphones	7.115	1.100.000	99 %
3.12	Digitalkamera (Foto)	170.782	5.371.000	97 %
3.13	Camcorder	18.974	1.093.333	98 %
3.14	LCD Monitor	355.766	1.734.000	79 %
3.15	LCD Fernseher	106.730	200.000	47 %
3.16.1	Monitor Röhre	3.190.035	4.600.000	31 %
3.16.2	Fernsehgerät Röhre	7.153.315	10.000.000	28 %
3.17	Fernbedienung	3.652.542	60.000.000	94 %
3.18	DVD/CD-Player/Videorekorder	3.735.652	8.422.500	56 %
3.19	Videospiel tragbar	16.602	100.000	83 %
3.20	Videospielkonsole	45.094	2.958.179	98 %
3.21	MP3 Player	9.487	7.900.000	100 %
3.22	Lautsprecherboxen	2.163.414	987.048	(-119 %)
3.23	Kopfhörer	175.521	8.091.000	98 %
4.1	Kompaktleuchtstofflampen	andere Sammelsysteme	84.829.538	andere Sammelsysteme
4.2	LED Lampen		0	
4.3	Leuchtstofflampen		73.400.841	
5.1	Bohrmaschine Akku	335.499	2.600.000	87 %

Re-Pro Nr	Altprodukt	Gesammelt (Hochrechnung) (Stück/a)	Abfallpotenzial (Stück/a)	Anteil nicht gesammelt (%)
5.2	Wecker, Batterie	0	6.300.000	100 %
5.3	Kaffeemaschine	76.004	4.934.000	98 %
5.4	Rasierapparate	225.608	4.680.000	95 %

Über die Auswertung von Literatur und Primärdaten wurde untersucht, inwiefern Aussagen zu den sonstigen Verbleibswegen von RePro-Geräten gemacht werden können. Die Untersuchungen zu Restabfallsortieranalysen, Sperrmüllanalysen, landbasierten und seebasierten Exporten ergab, dass keine ausreichende Datengrundlage für eine **gerätespezifische Schätzung** der Verluste von RePro-Metallen über diese Wege verfügbar ist.

Sammlung von EAG

In einer Literatur-Metaanalyse wurde die Frage untersucht, inwiefern Bequemlichkeit und weitere Faktoren bei der Abgabe von EAG das Entsorgungsverhalten von Endverbrauchern bei Elektroaltgeräten beeinflussen. Die Ergebnisse zeigten die wesentliche Bedeutung solcher Einflussfaktoren auf das Entsorgungsverhalten, z. B. dass eine kürzere Entfernung des Entsorgungspunkts zu häufigeren Besuchen, größeren Mengen an gesammelten Materialien und zu einer höheren Anzahl verschiedener gesammelter Materialien führt. Der Aufwand des Entsorgungsvorgangs, zum Beispiel die Zeit, die am Entsorgungspunkt investiert werden muss, hat ebenfalls wesentlichen Einfluss. Eine sehr gute Sichtbarkeit der Sammelpunkte wurde als wichtig für die Sammlung identifiziert. Idealerweise sollten demnach Sammelpunkte auf Wegen liegen, die im Alltag der Verbraucher sowieso zurückgelegt werden.

Die Sammlung von EAG aus privaten Haushalten auf den Wertstoffhöfen der örE stellte zum Untersuchungszeitpunkt den regulären Erfassungsweg dar. Zur Evaluierung des Status quo zur Sammlung der RePro-Geräte wurden Öffnungszeiten von insgesamt 3.213 Annahmestellen für Abfälle aus privaten Haushaltungen recherchiert. Demnach lag die durchschnittliche Öffnungszeit einer Sammelstelle in dem untersuchten Cluster bei 19,1 h/Woche. Die Ergebnisse für einen Referenzmonat sind in Abbildung 22 dargestellt. Zu grün schraffierten Uhrzeiten ist ein relativ hoher Anteil der Annahmestellen geöffnet, zu rot schraffierten Uhrzeiten ist ein geringer Anteil der Annahmestellen geöffnet.

Abbildung 2: Überblicksdarstellung der Verteilung der Öffnungszeiten (Angaben in % der Annahmestellen; Gesamtzahl: 3.213)

		Tageszeiten															
Tag		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
2	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
3	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
4	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
5	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
6	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
7	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
9	DI	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
10	MI	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
11	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
12	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
13	SA	0	2	26	74	86	81	33	16	9	5	1	0	0	0	0	0
14	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
16	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
17	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
18	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
19	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
20	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
21	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
23	DI	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
24	MI	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
25	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
26	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
27	SA	0	2	27	76	88	83	34	16	9	5	1	0	0	0	0	0
28	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
30	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
31	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0

Quelle: eigene Darstellung

Als Fazit ließ sich aus den Erhebungen ableiten, dass das bestehende Sammelsystem bei den Wertstoffhöfen der örE für Elektroaltgeräte wie den RePro-Geräten eine vergleichsweise geringe zeitliche Verfügbarkeit hat und die zeitliche Lage der Abgabemöglichkeiten für viele Verbraucherinnen und Verbraucher nur eingeschränkt nutzbar ist.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde die Rolle des Handels in ausgewählten europäischen Ländern und seines ungefähren Anteils an den jeweiligen Sammelmengen untersucht. Tabelle 3 gibt einen Überblick.

Tabelle 3: Sammelverpflichtung und Sammelquoten des Handels in europäischen Ländern

Land	1:1-Verpflichtung?	0:1-Verpflichtung für kleine EAG?	Sammelquote pro Kopf gesamt	Anteil Handel an Pro-Kopf-Quote	Anteil des Handels in %	Referenzjahr für Quoten
Belgien	Ja	Bedingt	10,41 kg	2,2 kg	21 %	2013
Dänemark	Nein	Nein	12,7 kg	k. A.	k. A.	2013
Frankreich	Ja	Ja, seit 2014 (≥ 400 m^2)	6,9 kg	1,8 kg	26 %	2012
Großbritannien	Ja	Ja (≥ 400 m^2)	7,42 kg	0,87 kg	11,75 %	2013
Italien	Ja	Nein	Offiziell: 4,3 kg	Offiziell: mind. 0,2 kg Geschätzt: 4 kg	Offiziell: 5 % Geschätzt: 35,7 %	2011
Irland	Ja	Ja, seit 2014 (≥ 400 m^2)	9,2 kg	3,3 kg	35,9 %	2012
Niederlande	Ja	Ja (≥ 400 m^2; Prüfung mögl.)	6,8 kg	2,3 kg	34 %	2013
Österreich	Ja, seit 2014 (Ausnahmen Geschäfte ≤150 m^2)	Nein	9 kg	k. A.	k. A.	2013
Schweden	Seit 2014	Seit 2014 (≥ 400 m^2)	17,3 kg	mind. 0,32 kg	mind. 1,8 %	2013
Schweiz	Ja	Ja	16,21 kg	mind. 1,65 kg	mind. 10,2 %	2013

Quelle: eigene Darstellung

Weiterhin wurden ergänzende Systeme zur Sammlung von kleinen EAG untersucht, die in anderen Mitgliedstaaten der EU umgesetzt sind. Die Ergebnisse wurden in die Nutzwertanalyse (siehe unten) einbezogen.

In der Nutzwertanalyse erfolgte die Untersuchung der Eignung von ergänzenden Sammelsystemen, die Anforderungen an die Sammlung von Elektroaltgeräten zu erfüllen. Dabei stellte das Ziel der Erhöhung der derzeitigen Sammelmenge ein wesentliches Kri-

terium dar. Die Ergebnisse zeigten, dass die Systeme die Zielerreichung in den verschiedenen Kriterien zu einem unterschiedlichen Grad erfüllten und stark variierten. Während die Sammlung mit Depotcontainern und der EAG-Tonne im Oberkriterium „Erreichbarkeit“ sehr gut bis überragend abschnitten, waren die Zielerfüllung für die anderen Oberkriterien nur mittelmäßig. Andersherum verhielt es sich bei dem Wertstoffmobil und dem Wertstoffhof, die beim Oberkriterium „Erreichbarkeit“ unterdurchschnittlich schlecht abschnitten, bei den Oberkriterien „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ sowie „Zustand“ gut bis überragend abschnitten, jedoch beim Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ die Ziele wiederrum unterdurchschnittlich erfüllten. Ein anderes Bild ergab sich bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ und bei der Sammlung am Arbeitsplatz bzw. in öffentlichen Gebäuden, die beide durch alle Kriterien hinweg sehr konstant gut bis sehr gut abschnitten, wobei die „Händlersammlung gesamt“ mit Ausnahme des Oberkriteriums „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ dominierte. Die Variante „Händlersammlung > 400 m²“ schnitt im Oberkriterium „Erreichbarkeit“ deutlich schlechter ab, als die andere Variante der Händlersammlung, unterschied sich in den anderen Oberkriterien jedoch gar nicht bis kaum von der „Händlersammlung gesamt“ (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Rangfolge der Sammelsysteme nach Zielerfüllung in den Oberkriterien

Oberkriterium	Depotcontainer	EAG-Tonne	Händlersammlung gesamt	Händlersammlung >400m2	Wertstoffmobil	Wertstoffhof	Arbeitsplatz/ öffentliche Gebäude
Erreichbarkeit	90 %	100 %	80 %	60 %	47 %	37 %	63 %
Akzeptanz & Diebstahlrisiko	58 %	52 %	78 %	78 %	80 %	80 %	72 %
Zustand	55 %	50 %	75 %	75 %	100 %	70 %	70 %
Wirtschaftlichkeit & Aufwand	65 %	68 %	67 %	68 %	72 %	47 %	75 %

Quelle: eigene Darstellung

Im Rahmen der Arbeiten zur Erfassung von RePro-Altgeräten wurde ebenfalls das Instrument „Pfand“ untersucht. Die Bewertung eines Pfandsystems muss den Aufwand für das ökonomische Anreizsystem im Verhältnis mit der zusätzlich gesammelten Altgerätemenge betrachten. Der Status quo der Erfassung von Elektrokleingeräten zeigte wie dargestellt sehr deutliche Optimierungspotenziale. Weiterhin wurde zum Untersuchungszeitpunkt in Deutschland kein umfassendes Kommunikationskonzept umgesetzt, das das

Thema der Erfassung von Elektrokleingeräten integrierend abdeckt. Vor diesem Hintergrund erschien es zum Untersuchungszeitpunkt sinnvoll, zunächst auf der Grundlage der Vorgaben der WEEE-Richtlinie und im Rahmen des neuen ElektroG, der Weiterentwicklung der Sammlung durch die örE, der Einbindung des Handels sowie eines integrierenden Kommunikationskonzeptes die Entwicklung der erfassten Mengen von Elektrokleingeräten zu verfolgen und in einem fokussierten Monitoring zu erfassen.

Die Sammlung von EAG sollte auch durch eine Kommunikationskampagne gefördert werden. Dazu wurden Elemente einer Dachkommunikationskampagne und Kommunikationsbotschaft entwickelt, welche sich auch auf unterschiedliche Geräte anpassen lassen. Um die Kommunikationsbotschaft mit der Handlungsaufforderung, Elektroaltgeräte richtig zu entsorgen, vermitteln zu können, wurde bei der Entwicklung der kreativen Ansätze die emotionale Grundhaltung der Zielgruppen in den Vordergrund gestellt. Auf dieser Grundlage wurde ein erstes Ideenpapier mit der strategischen Botschaft „Trennen ist nicht leicht. Richtig recyceln schon." vorgestellt. Diese strategische Botschaft wurde dann in eine emotionale Kommunikationsbotschaft „Deutschland trennt sich" überführt.

Behandlung und Rückgewinnung von RePro-Metallen

In einer umfassenden Untersuchung wurde der Status quo der Rückgewinnungstechnik für RePro-Metalle analysiert. Die Abbildung 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Abbildung 4: Status quo der Rückgewinnungstechnik für RePro-Metalle



Quelle: eigene Darstellung

Weiterhin wurde untersucht, welche Rückgewinnungskonflikte in den etablierten Rückgewinnungsrouten für die RePro-EAG bestehen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Rückgewinnungsrouten und -konflikte für die RePro-EAG und RePro-Metalle

Komponente der RePro-Produkte	RePro-Zielelemente	Großtechnisch verfügbare Rückgewinnungsroute	RePro-Zielelemente mit Rückgewinnungskonflikten in der genannte Route
Leiterplatten, leitende Verbindungen	Au, Ag, Pd, Co, Ga, Sn, Ta, Sb, Be	Integrierte Cu-Hütte	Co, (Ga), Ta, Be, SE
Akkumulatoren	Co	integrierte Pb-Hütte	SE
Ga-Komponenten, LED	Au, Ga, Ag, Sb, Sn	integrierte Pb-Hütte	Ta, Be
Bildschirme	In	nicht etabliert	
Magnete	Nd	Hydrometallurgie; nicht etabliert, technisch aber vor dem upscaling	
CRT	Y	Hydrometallurgie technisch realisierbar aber großtechnisch nicht etabliert	
Kondensatoren	Ta	Ta-Hütte	Ag,
Kunststoffe (Flammschutz)	Sb	für LP: Integrierte Cu-Hütte für Gehäuse: nicht etabliert	Co, (Ga), Ta, Be, SE
Kupferkontakte	Be	nicht etabliert	

Quelle: Eigene Darstellung

Die Anforderungen der bestehenden Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle an den Input, die Rückgewinnungskonflikte und eine detaillierte Analyse der derzeitigen Behandlung von EAG wurden als Basis für die Entwicklung und Durchführung mehrerer Versuchsreihen im halbtechnischen bis großtechnischen Maßstab genutzt. Ziel der Versuche war die Bereitstellung experimenteller Daten, aus denen Maßnahmen auf technischer und organisatorischer Ebene abgeleitet werden können, um die Rückgewinnung von RePro-Metallen aus EAG zu optimieren.

- Versuch 1 – Variation der Inputzusammensetzung: Mechanische Behandlung von sortenreinen und gemischten EAG der SG 3 und SG 5 inklusive einer manuellen Abwandlung,
- Versuch 2 – Variation der Aufbereitungstechnik: Mechanische und manuelle Behandlung von schnurgebundenen Festnetztelefonen,
- Versuch 3 – Mechanische Separation und Anreicherung von Tantal aus Laptop-Unterteilen,
- Versuch 4 – Aufbereitung von Feingut aus der mechanischen EAG-Behandlung mit dem Nasstrenntisch,

- Versuch 5 – Manuelle Entnahme von Batterien aus EAG der SG 3 und SG 5 und Identifikation von Synergien mit der Entnahme ressourcenrelevanter Komponenten.

Wesentliche Ergebnisse der Versuche waren:

- Eine Vorkonzentrierung des Inputs durch geeignete Sortierung der EAG vor der Behandlung wirkt sich positiv auf die Zielmetallkonzentrationen im Output aus.
- Durch eine gezielte Entnahme weitgehend unbeschädigter Platinen kann ein Großteil der ressourcenrelevanten Metalle aufkonzentriert werden. Für bestimmte Elemente kann die Entnahme weiterer Komponenten wie z. B. Elektromotoren mit seltenerd- oder Co-haltigen Magneten vorteilhaft sein.
- Bei der mechanischen Behandlung von EAG sollte der Anteil der erzeugten Feinfraktionen minimiert werden, sofern keine speziellen Prozesse für eine verlustarme Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen.
- Für eine gezielte Separation und Anreicherung spezifischer Elemente sind neue Aufbereitungstechnologien und Prozessketten notwendig, die in enger Verknüpfung mit den entsprechenden Rückgewinnungsverfahren zu entwickeln sind.
- Besonders für nicht-edle Technologiemetalle wie Ga, In, Nd, Y, und Ta wird eine parallele Entwicklung von neuen Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren benötigt, um technisch und wirtschaftlich funktionierende Prozessketten etablieren zu können.
- Eine systematische Bereitstellung von Demontageinformationen und Inhaltsstoffen durch die Gerätehersteller, zugeschnitten auf die Bedürfnisse der Recyclingbetriebe, könnte die Qualität und Quantität des Recyclings verbessern. Umgekehrt könnte eine Rückkopplung durch die Recyclingbetriebe hilfreich sein, um besonders ungeeignete Gerätekonstruktionen in Zukunft zu vermeiden.
- Eine Kennzeichnung von Komponenten und Bauteilen wäre hilfreich für eine schnelle Einordnung und Bewertung und könnte im Idealfall sogar automatisierte Sortierprozesse ermöglichen.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die im Projekt entwickelten Behandlungsempfehlungen wurden vor dem Hintergrund der Annahmen formuliert, dass eine Behandlungsverordnung auf der Basis des § 24 neuen ElektroG erlassen wird und ein Revisionszyklus von 5 Jahren integriert wird.

Für den Bereich der Sammlung wurden folgende Empfehlungen entwickelt:

- Gemeinsame Erfassung von besonders ressourcenrelevanten und weniger ressourcenrelevanten EAG,
- Sammelverpflichtung des Handels mindestens entsprechend den Vorgaben der WEEE-Richtlinie,
- Öffentlicher Raum: ADR-konforme Sammlung über Depotcontainer,
- mobile Sammlung: als Ergänzung, wenn eine solche Systemkomponente auch für andere Zwecke im Einsatz ist (z. B. Schadstoffmobil),
- Sammlung kleiner EAG am Arbeitsplatz oder in öffentlichen Gebäuden: nur bei Beaufsichtigung der Sammelstelle,
- Voraussetzung für die Erfassung von EAG über die Sperrmüllsammlung sollte die Einstellung der Straßensammlung zu allgemein festgelegten Terminen sein,

- Zusätzlich sollten ergänzende fallspezifische Komponenten etabliert werden (Großwohnanlagen, aktionsorientierte Sammlungen, …)
- Abkehr von den gesamtmassenbezogenen Sammelzielen und Berücksichtigung der Ressourcenrelevanz einzelner Gerätearten; eine Änderung von Sammelquoten sollte auf EU-Ebene erfolgen,
- Monitoring der Mengen aus dem Handel für alle angenommenen Geräte (Gebraucht-/Altgeräte) und Dokumentation des Beitrags des Handels zur Rohstoffeffizienz durch Kreislaufführung; ergänzend wurde empfohlen, dass Gebrauchtgeräte durch den Handel nur an zertifizierte ReUse-Betriebe abgegeben werden sollten.
- Im Rahmen eines integrierenden Kommunikationskonzept sollte eine Dachkampagne realisiert werden, die die bisherige Vielzahl der meist thematisch und/oder zeitlich recht begrenzten Kommunikationsaktivitäten im Bereich der Ressourceneffizienz durch Kreislaufführung durch eine übergeordnete Kommunikation ersetzt oder zumindest ergänzt.
- Kennzeichnung Hg-haltiger Geräte, solange über die RoHS noch Ausnahmen in diesen Bereichen erlaubt sind.
- Separation im Rahmen der Erstbehandlung: Entsprechend einer für den Endverbraucher möglichst einfachen Sammlung von EAG, ergibt sich ein heterogener Inputstrom für den Erstbehandler (Geräte mit hohen und niedrigen Gehalten an RePro-Metallen). Daher sollte als erster Schritt der Erstbehandlung auch eine Vorseparation Geräten mit hohen Gehalten an RePro-Metallen erfolgen.

Weiterhin wurden zielkomponentenspezifische Empfehlungen erarbeitet:

- Zielkomponente Leiterplatten:
    1. Für Hauptplatine **in PC** sollte angesichts sinkender Konzentrationen von Edelmetallen und PGM und der fortschreitenden Miniaturisierung und Integration eine Überprüfung der Behandlungsanforderung zur manuellen Separation großer Leiterplatten aus IT-Geräten im Revisionszyklus der Behandlungsverordnung erfolgen. Flankierend sollten Design-for-Dismantling-Anforderungen in der Ökodesign-Richtlinie aufgenommen werden.
    2. Leiterplatten von Festplatten sollten in Kombinationsverfahren zusammen mit Neodym-Magneten separiert werden.
    3. Für komplexe Geräte mit schlechter Zugänglichkeit der Leiterplatten sollte (neben der manuellen Demontage) auch der grobmechanische Aufschluss und die anschließende Separation der Leiterplatten in eine Behandlungsverordnung aufgenommen werden.
    4. Sehr kleine Geräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen sollten (ggf. nach Entfrachtung) direkt in der Metallurgie verwertet werden können.
- Zielelement Indium: Da die Separation von Indium aus Altprodukten im Versuchsstadium und für einige Behandlungsvarianten nur eine geringe ökologische Vorteilhaftigkeit des Indiumrecyclings aus Bildschirmen festgestellt wurde, wird empfohlen, die Ergebnisse der Verfahrensentwicklungen zur In-Separation zu prüfen und ggf. zukünftig in einer Behandlungsverordnung zu berücksichtigen.
- Zielelement Tantal: Zum Untersuchungszeitpunkt waren keine großtechnischen Verfahren für die Separation von Ta-Kondensatoren von Leiterplatten verfügbar. Es wurde daher empfohlen, Ergebnisse laufender Untersuchungen zur Separation

von Ta-Kondensatoren abzuwarten und ggf. die technologische Verfahrensentwicklung zu fördern.

- Zielelement Antimon: Zum Untersuchungszeitpunkt war kein Verfahren zur Kreislaufführung von Sb_2O_3 aus EAG-Kunststoffen und kein Verfahren zur automatischen Identifikation von Antimontrioxid-haltigen Kunststoffen verfügbar. Daher wurde auch hier empfohlen, die Ergebnisse laufender Entwicklungen zu evaluieren und ggf. entsprechende Förderungsansätze zu realisieren.
- Zielelemente Leuchtstoffe: Die Separation von Leuchtstoffen aus CRT ist rechtlich vorgeschrieben und großtechnisch möglich, Verwertungsverfahren sind jedoch nicht großtechnisch etabliert. Eine mögliche Unterstützung der Verfahrensentwicklung zur Rückgewinnung von SE aus Leuchtstoffen sollte die zukünftige Mengenentwicklung berücksichtigen. In eine Behandlungsverordnung sollte die Pflicht zur Zuführung in die Rückgewinnung der Seltenen Erden aus Gasentladungslampen aufgenommen werden.
- Zielsetzungen Recycling: Angesichts der mit großen Unsicherheiten verbunden Datengrundlage zu Gehalten von RePro-Zielelementen sowie der sehr großen Vielzahl von Geräten und ihren Variationen und der dynamischen Entwicklung neuer Geräte und ihrer Elementgehalte wird empfohlen, zukünftige ambitionierte Ziele über hohe Quoten der Zuführung zur Rückgewinnung in Kombination mit einer Vorbehandlungspflicht zu realisieren.
- Monitoringschnittstelle der Quotenfestlegung: Es wird empfohlen, Recyclingziele über inputorientierte Festlegungen zu definieren, anstatt über outputbezogene, da relevante Verwertungsverfahren hohe Komplexität aufweisen bei gleichzeitig großer Diversität des Input. Hierdurch wäre ein belastbares Monitoring, wenn es überhaupt gelingen kann, sehr aufwändig.
- Rahmensetzungen
    1. In der Ökodesign-RL sollten Ansätze zum Design-for-Dismantling und ggf. Kennzeichnungspflichten aufgenommen werden.
    2. ElektroG: Es sollte eine Behandlungsverordnung nach § 24 des neuen ElektroG entwickelt werden.
    3. WEEE-Richtlinie: In einer zukünftigen Überarbeitung der WEEE-Richtlinie sollte eine Ergänzung der gesamtmassenbezogenen Recyclingziele durch spezifische rohstofforientierte Ziele erfolgen.
    4. BattG-Durchführungsverordnung: Es wird die Ergänzung der gesamtmassenbezogenen Recyclingziele durch spezifische rohstofforientierte Ziele empfohlen.
    5. AltfahrzeugV: Hier sollte die Schnittstelle zum ElektroG klar definiert werden und elektrische und elektronische Komponenten aus Altfahrzeugen vergleichbaren oder denselben Behandlungsanforderungen unterliegen wie Elektroaltgeräte.
    6. In eine zukünftige, stärker kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft sollte der Europäische Abfallartenkatalog durch eine verstärkte Materialorientierung der Katalogstruktur eingebunden werden. Nationale 8-Steller sollten Europäische 6-Steller ergänzen.
    7. Zur Verbesserung des Informationsstandes zur Ausfuhr gebrauchter Elektro- und Elektronikgeräte sollte eine Differenzierung der Ausfuhrangaben zwischen Neugeräten und Gebrauchtgeräten erfolgen.

Summary

Goals, background and approach

Resource efficiency and closed cycle management are important economic and ecological goals that require technological and organisational implementation. A great economic value lies in precious and special metals as well as rare earth metals, for which recycling concepts need to be developed in the medium term. The recovery of precious and special metals and rare earths from domestic waste plays a key role here.

Many metals used in small quantities per electrical and electronic device, such as precious and special metals and rare earths, are also resource-relevant, because of the high specific environmental pollution caused when they are produced. In addition, there are often limited reserves and concentrations of these metals in newly developed deposits are declining. Furthermore, the recycling of these metals is made more difficult due to the dissipative use in products - hence, only insufficient or no recycling is carried out in many cases. Therefore, primary raw materials cannot be replaced by secondary raw materials.

Significant shares of the world production of the metals identified as environmentally relevant and/or critical are components of important technology development paths or future technologies and of applications for which rising demand is forecast.

Primary production of the identified metals oftentimes causes high environmental burdens. In order to create alternatives to primary production for current and future demand proper recycling of these materials needs to be established. This not only conserves primary raw materials but also contributes to the conservation of natural and environmental resources due to the generally lower environmental impact of recycling.

The growing resource potential of secondary metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) is currently not fully exploited, as shown by the collection rates achieved in Germany and various studies on the recovery rates. It is therefore essential that the concept for collection, treatment and recovery of waste electrical and electronic equipment be further developed.

Therefore, the main objective of the project was to develop targeted measures and instruments to further unexploit the potential for recycling of environmentally and resource-relevant metals from waste electrical and electronic equipment.

The project report covers the following areas of research:

- Based on an analysis of their criticality, relevant metals in electrical and electronic equipment (=RePro metals) in terms of resource conservation were identified (see Chapter 2).
- The next step was to identifiy electrical and electronic products containing relevant amounts of RePro metals (=RePro products) and a material flow analysis for RePro metals in RePro products with an identification of losses and potentials (see Chapter 3).
- The collection of RePro-WEEE is then analysed and evaluated (Chapter 4).
- In order to optimise the collection of WEEE, it is necessary, among other things, to motivate the last users to properly dispose of their devices. The communication concept presented in Chapter 4.7 can contribute to this.

- Processes for recovery of RePro metals from RePro products are analysed in Chapter 5.
- Subsequently, the pre-treatment of RePro-WEEE is analysed and evaluated and the results of trials to optimise treatment are presented (Chapter 6).
- The steps mentioned form the basis for the development, evaluation and weighing of measures and instruments for the optimised control, collection and treatment of RePro-WEEE and the reclamation of the resource-relevant metals contained (see Chapter 7).
- Finally, three different scenarios for the collection and treatment of waste electrical and electronic equipment were considered and element-specific material flows calculated on the basis of the quantifications carried out in this project (Chapter 8).

The focus of the investigation was on WEEE from private households as defined in § 3 ElektroG.

The analyses presented in this report refer to a state before the implementation of the revised ElektroG in 2015. Accordingly, definitions such as collection groups also refer to the legal situation before the ElektroG revision in 2015.

Selection of resource-relevant metals

The aim of this step was to identify resource-relevant metals in electrical and electronic products. This refers to metals with a high economic significance for the electrical and electronics industry as well as a high supply risk.

A list of metals was compiled as a starting point, from which the "resource-relevant" metals were subsequently selected for the project. Some metals were excluded from further consideration:

- Mercury (Hg), covered by the European Mercury Strategy,
- Lithium, which was intensively investigated by the Fraunhofer Institute ISI and was considered non-critical (Angerer et al.,2009a) and
- Magnesium, which does not occur quantity-relevant in electrical appliances compared to other areas of application.

The term "resource relevance" is not subject to any conclusive definition, but refers to strategic considerations for securing resources that have been made for the present project. The concept of the criticality matrix for raw materials proposed by Erdmann and Graedel (2011) was applied for the selection of strategically important metals. According to this matrix, the criticality of a commodity is defined as the uncertainty about the stability of current or future commodity supply. Criticalitly is thus composed of the economic importance of a commodity and the supply risk or availability of a commodity. The higher the supply risk and the greater its economic significance, the more critical the supply situation of the raw material becomes.

As a result of the selection process, a list of metals (see Figure 1) was created, which will herinafter be referred to as RePro metals. Neodymium and Yttrium were selected to represent the 17 rare earth metals.

Figure 1: Overview RePro metals (orange) in the periodic table

Wasser-stoff																Helium
Lithium	Beryllium										Bor	Kohlenstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Fluor	Neon
Natrium	Magne-sium										Alumi-nium	Silizium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon
Kalium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Kobalt	Nickel	Kupfer	Zink	Gallium	Germa-nium	Arsen	Selen	Brom	Krypton
Rubi-dium	Stron-tium	Yttrium	Zirconium	Niob	Molyb-dän	Techne-tium	Ruthe-nium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium	Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Jod	Xenon
Caesium	Barium *	Lutetium	Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksil-ber	Thallium	Blei	Wismut	Polonium	Astat	Radon
Francium	Radium **	Lawren-cium	Ru-therfordium	Dubnium	Seabor-gium	Bohrium	Hassium	Meitne-rium	Darmstad-tium	Ro-entgenium	Coperni-cium	Unun-trium	Unun-quadium	Ununpen-tium	Unun-hexium	Ununsep-tium	Ununoc-tium
	* Lanthanide	Lanthan	Cer	Praseo-dym	Neodym	Prome-thium	Sama-rium	Euro-pium	Gadoli-nium	Terbium	Dyspro-sium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium		
	** Actinide	Actinium	Thorium	Protacti-nium	Uran	Neptu-nium	Pluto-nium	Ameri-cium	Curium	Berkelium	Califor-nium	Einstei-nium	Fermium	Mendele-vium	Nobelium		

Source: own representation

Localisation and quantification of RePro metals

For the localization and quantification of RePro metals in 30 electrical and electronic devices to be selected, the use of RePro metals in electrical and electronic devices were first localized at the component level (metal component matrix). Subsequently, components were assigned to products (component product matrix). The matrix was used to select 30 electronic devices that were particularly relevant to the objective of this project (= RePro devices). The quantification of the RePro metals in the RePro devices was carried out by market studies on the quantities placed on the market and the determination of the waste potential as well as the disposal routes. The 30 RePro devices listed in the Table 1 were selected based on the following criteria:

- Devices of the collection groups 3, 4 and 5 of the ElektroG,[3]
- Focus on the future volume of waste equipment, so that novel applications that are not currently WEEE (e.g. tablet computers) were also taken into account,
- Representative products: as some components, such as accumulators, are used in various products, individual representative products have been selected,
- Absolute quantity: in addition to the quantity of metals used per product, estimates of the absolute quantities of metals placed on the market have also been considered,
- Differentiation from other research projects: Products that in some cases contain considerable amounts of RePro metals (e.g. gas discharge lamps, photovoltaic modules) are not regarded, as the respective products and their mass flows have already been included in other projects (Sander et al. 2015, Sander et al. 2016).

[3] Collection group 3: Information and telecommunications equipment, consumer electronics; Collection group 4: Gas discharge lamps; Collection group 5: Small household appliances, lighting fittings, electrical and electronic tools, toys, sports and leisure equipment, medical devices, monitoring and control instruments.

Table 1: RePro devices

Collection Group	Running. No.	Device
3 equipment (information and telecommunications equipment, consumer electronics)	3.1	PC
	3.2	Laptop
	3.3	Tablet Computer
	3.4	External hard disks
	3.5	USB flash drive
	3.6	Beamer
	3.7	Multifunction printer, scanner, laser printer
	3.8	Cordless home phone
	3.9	Navigation device
	3.10	Mobile
	3.11	Smartphone
	3.12	Digital camera
	3.13	Camcorder/Video Camera
	3.14	LCD monitor
	3.15	LCD TV
	3.16	CRT devices
	3.17	Remote control
	3.18	DVD player
	3.19	Portable video games
	3.20	Video game consoles
	3.21	MP3 player
	3.22	Loudspeakers
	3.23	Headphones
4 devices (gas discharge lamps)	4.1	Energy-saving lamps
	4.2	LED Lamps
	4.3	Fluorescent tubes
5 equipment (small household appliances, lighting fixtures, tools, toys, sports and leisure equipment, medical devices, monitoring and control instruments)	5.1	Drilling machine, battery-operated
	5.2	Alarm clock, battery operated
	5.3	Coffee maker
	5.4	Razor

For the selected 30 RePro devices, the amounts of RePro metals contained were researched. In order to be able to at least obtain estimates for the the data gaps identified in the literature evaluations, 30 devices were chemically analysed.

The researched and empirically obtained data on metal contents and the data on product quantities and weights obtained within the framework of the market analysis were combined in a subsequent work step. The following types of equipment were found to contain significant amounts of RePro metals:

- **Gold:** MP3 players, mobile phones, digital cameras,
- **Silver:** MP3 player, navigation devices, communication devices (mobile phone, smart- phone, cordless home phone), DVD player,
- **Palladium:** MP3 players, navigation devices, communication devices (cell phones, smart phones, cordless home phones), camcorders and digital cameras,
- **Cobalt:** complex portable electronic products, tools, smartphones and mobile phones,
- **Gallium**: cell phones, digital cameras, remote controls,
- **Indium:** flat screens, mobile phones, tablet computers, portable video game machines,
- **Tin:** video game equipment, many other products,
- **Neodymium:** acoustic applications (headphones, loudspeakers), external hard disks,
- **Yttrium:** monitors and televisions with CCFL technologies, energy saving lamps,
- **Tantalum:** digital cameras, camcorders, laptops, mobile phones.

Waste potential

The potential waste quantities (waste potential) in Germany for the 30 RePro products were determined for the years 2012 (year of sorting analysis, see below) and 2020 on the basis of the "simple delay" method (Chancerel 2010, Wang 2013).

In a sorting analysis for waste equipment in collection groups 3 and 5, primary data was collected on the types and quantities of WEEE actually arriving at the primary treatment facilities. The results obtained were compared with data from other disposal facilities and evaluated. On this basis, a theoretical collection quota for RePro devices was determined by comparing the determined quantities of the RePro EAG recorded with the waste potential (see Table 2).

The low proportion of PCs not recorded may be due to the fact that only PCs for private use have been included in the market analysis (consumer market according to CEMIX) even though PCs from the business sector may also be included in the collection at the municipalities. If the PCs from the business area were included in full, the proportion of uncollected devices would be around 70 %.

The negative value for the proportion of uncollected loudspeaker equipment may be due to faster product replacement by users as a result of changes in technology (active loudspeakers).

The very low detection values for laptops, tablets, smartphones, mobile phones, camcorders, digital cameras and navigation devices match with the statements made by first treatment sites that such very valuable types of devices are rarely to be found in deliveries.

It is assumed that USB flash drives and MP3 players are particularly likely to end up in other waste streams due to their small size.

Table 2: Projected collection volume and waste potential for RePro products for 2012

RePro No	Used product	Collected (extrapolation) (piece/a)	Waste potential (pieces/a)	Share not collected (%)
3.1	PC	1,563,085	1,790,000	13 %
3.2	Laptops, Notebooks	166,066	1,945,000	91 %
3.3	Tablet Computer	0	50,000	100 %
3.4	Hard disk (external)	21,351	17,884,000	100 %
3.5	USB flash drives	4,744	12,999,000	100 %
3.6	Projectors (Beamer)	80,764	200,000	60 %
3.7	Multifunction Printer	408,329	2,360,000	83 %
3.8	Telephones	1,259,490	5,718,760	78 %
3.9	Navigation Devices	9,487	2,160,000	100 %
3.10	Mobile	208,719	20,740,000	99 %
3.11	Smartphones	7,115	1,100,000	99 %
3.12	Digital Camera (photo)	170,782	5,371,000	97 %
3.13	Camcorder	18,974	1,093,333	98 %
3.14	LCD monitor	355,766	1,734,000	79 %
3.15	LCD TV	106,730	200,000	47 %
3.16.1	Monitor Tube	3,190,035	4,600,000	31 %
3.16.2	Television Tube	7,153,315	10,000,000	28 %
3.17	Remote Control	3,652,542	60,000,000	94 %
3.18	DVD/ CD/Video Player	3,735,652	8,422,500	56 %
3.19	Portable Video Game	16,602	100,000	83 %
3.20	Video Game Console	45,094	2,958,179	98 %
3.21	MP3 Player	9,487	7,900,000	100 %
3.22	Loudspeaker Boxes	2,163,414	987,048	(-119 %)
3.23	Headphones	175,521	8,091,000	98 %
4.1	Compact Fluorescent Lamps	Other collection systems	84,829,538	Other collection systems
4.2	LED Lamps		0	
4.3	Fluorescent Lamps		73,400,841	
5.1	Drill Battery	335,499	2,600,000	87 %
5.2	Alarm clock, Battery	0	6,300,000	100 %
5.3	Coffee Maker	76,004	4,934,000	98 %

RePro No	Used product	Collected (extrapolation) (piece/a)	Waste potential (pieces/a)	Share not collected (%)
5.4	Razors	225,608	4,680,000	95 %

Source: Own compilation from different sources

Evaluations of literature and primary data were used to investigate the extent to which insights can be gained on the fait of RePro devices not accounted for. Investigations on residual waste sorting analyses, bulky waste analyses, land-based and sea-based exports showed that there is no sufficient data basis for **device-specific estimates** of the losses of RePro metals via these routes.

Collection of WEEE

In a literature meta-analysis, the question was investigated to what extent convenience and other factors in the hand over of WEEE influence the disposal behaviour of end consumers of WEEE. The results show the importance of such influencing factors on disposal, e. g. close proximity of the disposal point leads to more frequent visits, larger quantities of collected materials and a higher number of different collected materials. The needed efforts for disposal, for example the time invested at the disposal point, also has a significant impact. High visibility of collection points was identified as another important factor. Ideally, collection points should be located on commtes and frequent routes of consumers.

The collection of WEEE from private households at the recycling centres of the municipalities represented the default collection method at the time of the study. In order to evaluate the status quo of the collection of RePro devices, the opening hours of a total of 3,213 collection points for waste from private households were researched. Accordingly, the average opening time of an collection point in the investigated cluster was 19 h/week. The results for a reference month are shown in Figure 2. At times with green hatching, a relatively high proportion of the collection points are open, at times with red hatching, a low proportion of the collection points are open.

Figure 2: Overview of the distribution of opening hours (data in % of acceptance points)

		Time															
Day		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
2	TU	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
3	WE	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
4	TH	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
5	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
6	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
7	SU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
9	TU	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
10	WE	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
11	TH	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
12	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
13	SA	0	2	26	74	86	81	33	16	9	5	1	0	0	0	0	0
14	SU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
16	TU	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
17	WE	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
18	TH	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
19	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
20	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
21	SU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
23	TU	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
24	WE	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
25	TH	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
26	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
27	SA	0	2	27	76	88	83	34	16	9	5	1	0	0	0	0	0
28	SU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
30	TU	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
31	WE	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0

Source: own presentation

From the surveys of the municipal reccling centres (örE) it can be concluded, that the existing collection system for waste electrical and electronic equipment such as the RePro appliances has a comparatively low availability, both, in terms of duration of business hours and the time of day the collection points are opened.

In a further step, the role of retailers in selected European countries and the approximate share of the quantities of WEEE collected were examined. Table 3 gives an overview.

Table 3: Collection obligation and collection quotas of retailers in European countries

Country	1:1 collection obligation?	0:1 collection obligation for small	Total collection rate per capita	Share of retailers per capita quota	Share of retailers %	Reference year for quotas
Belgium	Yes	Conditional	10.41 kg	2.2 kg	21	2013
Denmark	No	No	12.7 kg	k. A.	k. A.	2013
France	Yes	Yes, since 2014 (≥ 400 m^2)	6.9 kg	1.8 kg	26	2012
UK	Yes	Yes (≥ 400 m^2)	7.42 kg	0.87 kg	11.75	2013
Italy	Yes	No	Official: 4.3 kg	Official: min. 0.2 kg Estimated: 4 kg	Official: 5, Estimated: 35.7	2011
Ireland	Yes	Yes, since 2014 (≥ 400 m^2)	9.2 kg	3.3 kg	35.9	2012
Netherlands	Yes	Yes (≥ 400 m^2; examination possible)	6.8 kg	2.3 kg	34	2013
Austria	Yes, since 2014 (exceptions shops ≤ 150 m^2)	No	9 kg	k. A.	k. A.	2013
Sweden	Since 2014	Since 2014 (≥ 400 m^2)	17.3 kg	min. 0.32 kg	at least 1.8	2013
Switzerland	Yes	Yes	16.21 kg	min. 1.65 kg	at least 10.2	2013

Source: own representation

Complementary systems for the collection of small WEEE implemented in other EU Member States were also examined. The results were included in the benefit analysis (see below).

The benefit analysis examined the suitability of supplementary collection systems to meet the requirements for the collection of waste electrical and electronic equipment. The objective of increasing the current collection volume is an essential criterion in this respect. The results show great variability among the different systems' ability to meet

the objectives of the various criteria. While the collection with containers and the WEEE recycling bin perform very well with regard to the category "accessibility", these collection pathways only exhibit mediocre performace with regards to the achievement of other objectives and criteria. Conversely, the mobile recycling centre and the recycling centre perform poorly to below average regarding "accessibility" but perform well to above average in the "acceptance & theft risk" and "condition" categories. In "efficiency & expenditure" these collection pathways, again, perform poorly below average. In contrast, the "all retailers' collection" scenario and the "collection at the workplace or in public buildings" both perform consistently well to very well regarding all criteria, with the "all retailers' collection" dominating with the exception of the upper criterion "Economy & efforts". The scenario "collection at retailers > 400 m²" performs significantly worse in the "accessibility" category than "all retailers' collection", but performance hardly differs in other categories.

Figure 3: Ranking of collection systems regarding fullfillment of criteria

Criteria	Container	WEEE recycling bin	Retailers' collection	Retailers' collection >400m²	Mobile recycling centre	Recycling centers	workplace / public buildings
Accessibility	90%	100%	80%	60%	47%	37%	63%
Acceptance & theft risk	58%	52%	78%	78%	80%	80%	72%
Condition	55%	50%	75%	75%	100%	70%	70%
Economy & efforts	65%	68%	67%	68%	72%	47%	75%

The instrument of an "EEE deposit" was also examined as part of the work on collection of RePro waste equipment. The assessment of a deposit system must consider the cost of the economic incentive system in relation to the additional amount of waste equipment collected. As shown above, the status quo of the collection of small WEEE showed very clear potenzial for optimisation. Furthermore, at the time of the study, no comprehensive communication concept was implemented in Germany concerning the collection of small WEEE. Therefore, it was proposed at the time of the study to first analyse the development of the collected quantities of small WEEE after optimisation of the collection and only then further consider a deposit systems for WEEE.

As mentioned, the collection of WEEE should also be promoted through a communication campaign. For this purpose, elements of an umbrella campaign and a clear message were developed, which can also be adapted to different devices. In order to be able to encourage proper disposal of WEEE through the communication, the emotional attitude of the target groups was placed at the center of the development of the creative approaches. On this basis, a first concept paper with the strategic message "separation is hard - proper recycling is not" has been presented. This strategic message was then translated into an emotional communication message: "Germany is separating".

Treatment and recovery of RePro metals

In a comprehensive review, the status quo of the recovery techniques for RePro metals was analysed. It revealed that reclamation processes for tantalum, cobalt, palladium, silver, gold, indium and tin are established. Reclamation processes for beryllium, yttrium, neodymium and gallium are not established on a industrail scale. Processes for antimony are partially established.

Furthermore, it was examined which reclamation conflicts exist in the established reclamation routes for RePro-WEEE (see Table 4).

Table 4: Reclamation routes and reclamation conflicts for RePro-WEEE and RePro-metals

Component of RePro products	RePro target elements	Industrially available recovery route	RePro target elements with recovery conflicts in said
Printed circuit boards, conductive connections	Au, Ag, Pd, Co, Ga, Sn, Ta, Sb, Be	Integrated copper smelter	Co, (Ga), Ta, Be, REE
Accumulators	Co	integrated Pb smelter	REE
Ga components, LED	Au, Ga, Ag, Sb, Sn	integrated Pb smelter	Ta, Be
Monitors	In	unestablished	
Magnets	Nd	Hydrometallurgy; not established, technically before upscaling	
CRT	Y	Hydrometallurgy technically feasible but not established on a large scale	
Capacitors	Ta	Ta smelter	Ag,
Plastics (flame retardant)	Sb	For printed circuit boards: Integrated copper smelter, for housing: not established	Co, (Ga), Ta, Be, REE
Copper contacts	Be	unestablished	

The input spefications for the existing recovery processes for RePro metals, the reclamation conflicts and a detailed analysis of the current treatment of WEEE in Germany were used as a basis for the development of several experiments on a semi-industrial to large-scale scale. The aim of the trial series was to provide experimental data from which technical and organisational measures can be derived to optimise the recovery of RePro metals from WEEE:

- Experiment 1 – Variation of the input composition: Mechanical treatment of pure and mixed EAG of SG 3 and SG 5 including a manual variation,
- Experiment 2 – Variation of the processing technique: Mechanical and manual handling of corded landline telephones,
- Experiment 3 – Mechanical separation and concentration of tantalum from laptop bases,

- Experiment 4 – Treatment of fines from mechanical EAG treatment with the wet separation table,
- Experiment 5 – Manual removal of batteries from EAG of SG 3 and SG 5 and identification of synergies with the removal of resource-relevant components.

The main results of the trials were as follows:

- A pre-concentration of the input by appropriate sorting of the WEEE before treatment has a positive effect on the concentration of target metals in the output.
- A large part of the resource-relevant metals can be concentrated by targeted removal of largely undamaged printed circuit boards. The removal of further components, such as electric motors with rare earth or Co-containing magnets, can be advantageous for certain elements.
- In the mechanical treatment of WEEE, the proportion of fine fractions produced should be minimised unless special processes are available for low-loss further processing.
- For the targeted separation and concentration of specific elements, new processing technologies and process chains are necessary, which are to be developed in close connection with the corresponding recovery processes.
- Especially for non-precious technology metals such as Ga, In, Nd, Y, and Ta, a parallel development of new preparation and recovery processes is required in order to establish technically and economically functioning process chains.
- A systematic provision of dismantling information and device composition by equipment manufacturers, tailored to the needs of recyclers, could improve the quality and quantity of recycling.
  Conversely, feedback from recycling companies could be helpful to avoid particularly unsuitable device designs in the future.
- The labelling of components and parts would be helpful for a quick classification and evaluation and could ideally even enable automated sorting processes.

Conclusions and recommendations

The recommendations developed in the project were developed under the assumptions that a treatment ordinance based on § 24 of the new ElektroG would be issued and a revision cycle of 5 years integrated.

The following recommendations have been developed regarding the collection of WEEE:

- Joint collection of particularly resource-relevant and less resource-relevant EAGs,
- Collection obligation of the retailers at least according to the requirements of the WEEE directive,
- Public space: ADR-compliant collection via containers,
- Mobile collection: supplemental, if such a system component is also used for other purposes (e. g. mobile hazardous waste collection),
- Collection of small WEEE at the workplace or in public buildings: only if the collection point is supervised,
- The collection of WEEE should not be carried out as part of curbside bulk waste collection as long as the collection is conducted according to a public collection schedule,
- Furthermore, additional case-specific components should be established for collection systems (large housing estates, action-oriented collections, ...).

- A move away from the mass-based collection targets and consideration of the resource relevance of individual equipment types; this change in collection targets should take place at EU level,
- Monitoring of the quantities of all accepted equipment (used/old equipment) at retailers and documentation of the retailers's contribution to raw material efficiency through recycling; in addition, it was recommended that used equipment should only be submitted by the retailers to certified ReUse companies,
- As part of an integrated communication concept, an umbrella campaign should be implemented that replaces or at least supplements the large number of selective communications with different directions and objectives in the area of resource efficiency through closed-loop management. These existing communication is often limited in time and not geared to continuous awareness raising.
- Labelling of devices containing Hg, as long as RoHS still permits exceptions in these areas.
- Separation during primary treatment: the collection of WEEE focussing on convenience for the end user results in a heterogeneous input stream for the primary treatment facilities (devices with high and low RePro metal contents). Therefore, as a first step of the initial treatment, a pre-separation device with a high content of RePro metals should be applied.

In addition, target component-specific recommendations were developed:

- Target component Printed Circuit Boards:
    1. For motherboards **in PC**, with regard to declining concentrations of precious metals and PGM and progressive miniaturisation and integration, the treatment requirement for manual separation of large printed circuit boards from IT devices of the Treatment Ordinance should be reviewed in the revision cycle. Design for Dismantling requirements should also be included in the Ecodesign Directive.
    2. Printed circuit boards of hard disks should be separated in combination with neodymium magnets.
    3. For complex devices with poor accessibility of the printed circuit boards, coarse mechanical cracking of the device and subsequent separation of the printed circuit boards should also be included in a treatment ordinance (in addition to manual disassembly).
    4. Very small devices with high contents of RePro metals should – where appropriate – be recycled directly in metallurgy (after depollution if required).
- Target element indium: the separation of indium from waste products was found to be in the experimental stage and was found to have only a low ecological advantage compared to primary production for some treatment variants. Therefore, it is recommended to closely examine the developments in In-separation processes and, if appropriate, to consider them for future revisions of a Treatment Ordinance.
- Target element tantalum: At the time of this study, no large-scale processes were available for the separation of Ta capacitors from printed circuit boards. It was therefore recommended to wait for the results of ongoing research concerning the separation of Ta capacitors and, if appropriate, to promote technological process development.

- Target element antimony: At the time of this study, there was no method available for re- cycling Sb_2O_3 from WEEE plastics and no method for automatically identifying plastics containing antimony trioxide. It is therefore recommended to evaluate the results of ongoing developments and, if appropriate, to fund further research.
- Target substance phosphors: The separation of phosphors from CRT is legally required and technically possible on an industrial scale, but recycling processes are not established on a large scale. A possible support of the process development for the recovery of REE from phosphors should consider the decrease in phosphors arising. A Treatment Ordinance should include the obligation to feed rare earth elements from gas discharge lamps into the recovery process.
- Recycling targets: With regard to the high uncertainties associated with the data on contents of RePro target elements as well as the very large number of devices and their variations and the dynamic development of new devices and their element contents, it is recommended to implement ambitious goals by setting high input-based recovery targets in combination with a pre-treatment obligation.
- Monitoring interface for quota determination: It is recommended to define recycling tar- gets using input-based specifications rather than using an output-baed definition, as relevant recovery processes are highly complex and at the same time highly diverse. This would make resilient monitoring, if at all possible, very costly.
- Frameworks
    1. The Ecodesign Directive should include concepts for design for dismantling and, where appropriate, labelling requirements.
    2. ElektroG: A Treatment Ordinance according to § 24 of the new ElektroG should be developed.
    3. WEEE Directive: in a future revision of the WEEE Directive, the general mass-based re-cycling targets should be supplemented by specific raw material-oriented tar-gets.
    4. BattG implementation ordinance: The addition of specific material-based targets to the general mass-based recycling targets is recommended.
    5. End-of-life vehicle ordinance: Here the interface to the ElektroG should be clearly defined and electrical and electronic components from end-of-life vehicles should be subject to comparable or the same treatment requirements as waste electrical and electronic equipment.
    6. The European Waste Catalogue should be integrated into a future, more circular raw materials economy employing a catalogue structure focused on materials. National 8-digits should complement European 6-digits.
    7. In order to improve the level of information on the export of used electrical and electronic equipment, export data should be differentiated between new and used equipment.

1 Ziele, Hintergründe und Vorgehensweise

Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft sind bedeutende volkwirtschaftliche und ökologische Ziele, die einer technologischen und organisatorischen Ausgestaltung bedürfen. Ein großer volkswirtschaftlicher Wert liegt in Edel- und Sondermetallen sowie Metallen der Seltenen Erden, für die mittelfristig Konzepte der Kreislaufführung geschaffen werden müssen. Die Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen und Seltenen Erden aus Abfällen privater Haushalte nimmt dabei eine Schlüsselposition ein.

Viele in geringen Mengen je Elektro- und Elektronikgerät eingesetzte Metalle wie z. B. Edel- und Sondermetalle und Seltene Erden sind wegen der hohen spezifischen Umweltbelastungen, die bei ihrer Gewinnung entstehen, ressourcenrelevant. Hinzu kommen oftmals begrenzte Reserven und eine geringere Konzentration der Metalle in neu zu erschließenden Vorkommen. Weiterhin ist das Recycling dieser Metalle durch den dissipativen Einsatz in den Produkten erschwert – in vielen Fällen findet deshalb keine oder nur eine unzureichende Kreislaufführung statt. Dadurch können Primärrohstoffe nicht durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden.

Von Seiten der Wirtschaft und Politik werden vor allem Versorgungsrisiken thematisiert – hier wird von kritischen bzw. wirtschaftskritischen Metallen gesprochen. Je nach gewählten Kriterien umfasst dies verschiedene Elemente und es bestehen Schnittmengen mit den Metallen, die als Umweltrelevant gesehen werden.

Signifikante Anteile der Weltproduktion der als umweltrelevant und/ oder kritisch identifizierten Metalle werden für die Produktion von Elektro- und Elektronikgeräten (EEG), Fahrzeugbestandteilen und Batterien benötigt, darunter auch Umwelttechniken wie Katalysatoren, Batterien für Elektroautos und Photovoltaikmodule. Sie sind somit Bestandteile wichtiger Technologieentwicklungspfade bzw. Zukunftstechnologien[4] und von Anwendungen, für die eine steigende Nachfrage prognostiziert wird.

Um die derzeitige und zukünftige Nachfrage nicht rein aus Primärmetallen mit ihren teilweise hohen Umweltlasten decken zu müssen, ist die Kreislaufführung der Metalle notwendig. Hierdurch werden nicht nur Primärrohstoffe geschont sondern aufgrund der i.d.R. geringeren Umweltbelastungen der Kreislaufführung auch zur Schonung von Natur- und Umweltressourcen beigetragen.

Das wachsende Ressourcenpotenzial von Sekundärmetallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) wird gegenwärtig noch nicht optimal erschlossen, wie u. a. die in Deutschland erreichten Sammelquoten und verschiedene Studien zur Rückgewinnungsquote zeigen. Daher sollte das Konzept der Sammlung, Behandlung und Verwertung von Elektroaltgeräten unbedingt eine Weiterentwicklung erfahren.

Das Hauptziel des durchgeführten Projektes war daher die Entwicklung zielgerichteter Maßnahmen und Instrumente zur besseren Nutzung bisher nicht ausgeschöpfter Potenziale zur Kreislaufführung von umwelt- und ressourcenrelevanten Metallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten.

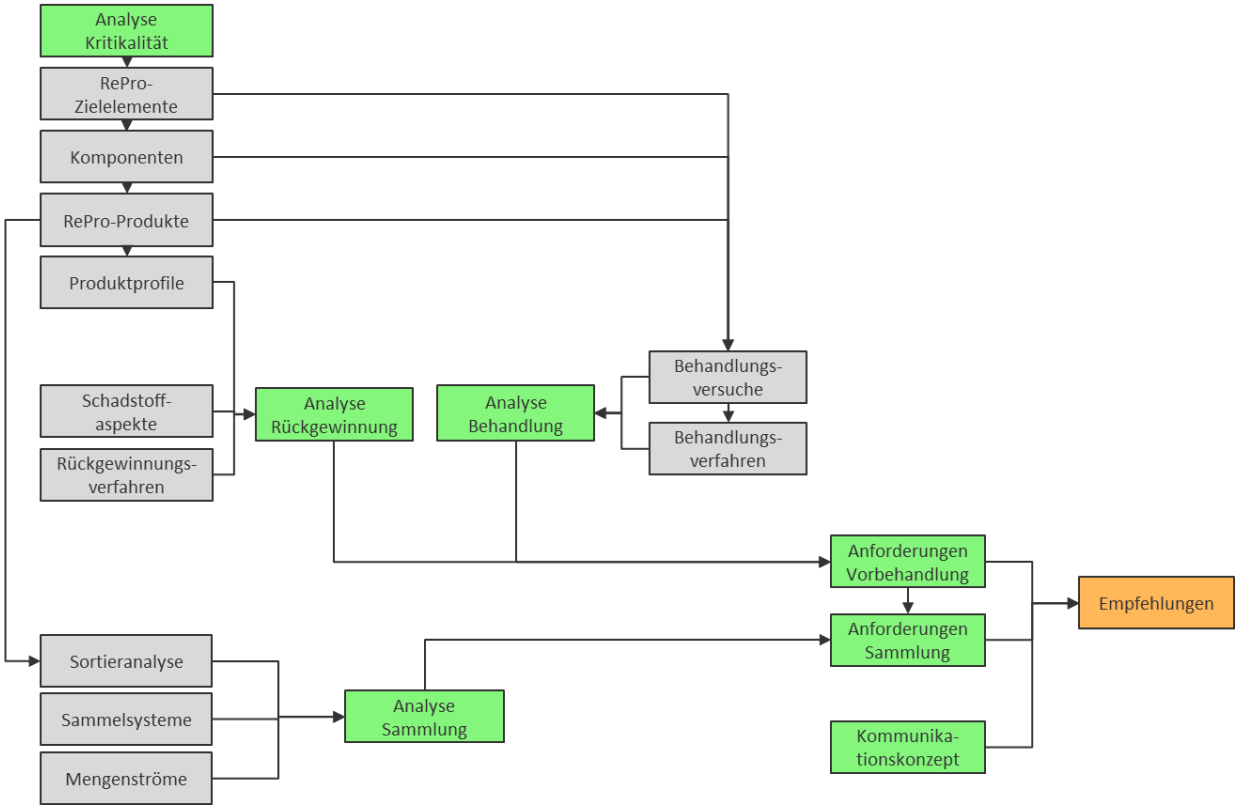
[4] Unter Zukunftstechnologien werden industriell verwertbare technische Fertigkeiten verstanden, die Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren hinaus auslösen, wie z. B. die Elektromobilität (Angerer et al. (2009a); Elsner et al. (2010)).

Der Projektbericht umfasst die folgenden Arbeitsbereiche:

- Auf der Basis einer Kritikalitätsanalyse wurden die mit Blick auf die Ressourcenschonung relevanten Metalle in Elektro- und Elektronikgeräten (=RePro-Metalle) identifiziert (siehe Kapitel 2).
- Im nächsten Schritt erfolgte eine Bestimmung der Elektro- und Elektronikprodukte, die für die ausgewählten RePro-Metalle besondere Relevanz aufweisen (=RePro-Produkte) und eine Mengenstrombetrachtung für RePro-Metalle in RePro-Produkten mit einer Identifizierung von Verlusten und Potenzialen (siehe Kapitel 3).
- Anschließend wird die Sammlung von EAG analysiert und bewertet (Kapitel 4).
- Um die Sammlung von EAG zu optimieren ist unter anderem auch eine Motivation der Letztnutzer notwendig. Das Kommunikationskonzept, das in Kapitel 4.7 dargestellt wird, kann hierzu einen Beitrag leisten.
- Die Rückgewinnungsprozesse von RePro-Metallen aus RePro-Produkten werden in Kapitel 5 analysiert.
- Anschließend wird die Vorbehandlung von RePro-EAG analysiert und bewertet und es werden Ergebnisse von Versuche zur Optimierung der Behandlung dargestellt (Kapitel 6).
- Die genannten Schritte bildeten die Basis zur Entwicklung, Bewertung und Abwägung von Maßnahmen und Instrumenten zur optimierten Steuerung, Erfassung und Behandlung von EAG und der Rückgewinnung der enthaltenen ressourcenrelevanten Metalle (siehe Kapitel 7).
- Abschließend wurden zur Verdeutlichung der Ressourcenpotenziale drei unterschiedliche Szenarien der Sammlung, Erfassung und Behandlung von Elektroaltgeräten betrachtet und auf der Basis der in diesem Vorhaben durchgeführten Quantifizierungen elementspezifische Mengenstrombilanzen errechnet (Kapitel 8).

Die Vorgehensweise ist in der folgenden Abbildung 5 zusammengefasst.

Abbildung 5: Überblicksdarstellung zur Vorgehensweise im Projekt RePro



Quelle: eigene Darstellung

Basisschritte Auf der Basis einer Kritikalitätsanalyse wurden die mit Blick auf die Ressourcenschonung relevanten Metalle in Elektro- und Elektronikgeräten (=RePro-Metalle) identifiziert. Im nächsten Schritt erfolgte eine Bestimmung der Elektro- und Elektronikprodukte, die für die ausgewählten RePro-Metalle besondere Relevanz aufweisen (=RePro-Produkte). Dazu wurde zunächst ermittelt, in welchen Komponenten die RePro-Metalle enthalten sind und anschließend, in welchen Geräten diese Komponenten hauptsächlich genutzt werden.

Analyse Sammlung: Die Erfassungsmengen der RePro-Produkte wurde in einer Sortieranalyse untersucht und es wurde eine Mengenstrombilanzierung erarbeitet. In Verbindung mit der Recherche von Sammelsystemen für EAG erfolgte darauf basierend eine Analyse und Bewertung der Sammlung von EAG in Deutschland.

Analyse Rückgewinnung: Über die Auswertung zu Produktprofilen der RePro-Produkte, die Recherche zu Schadstoffaspekten und zu Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle erfolgte eine Analyse der Rückgewinnungssituation von RePro-Metallen.

Analyse Behandlung Aus den Ergebnissen der Kritikalitätsanalyse zur Identifikation von RePro-Metallen sowie den Recherchen zu den Komponenten und den RePro-Produkten wurden Behandlungsversuche entwickelt und die Behandlung von EAG analysiert. Dabei wurde zur Identifikation von Zielen

der Behandlung die Anforderungen der Rückgewinnungsanlagen an ihren Input herangezogen (siehe vorheriger Absatz).

Zusammenführung Aus den Komponenten „Analyse Sammlung“, „Kommunikationskonzept“, „Analyse Behandlung“ und „Analyse Rückgewinnung“ wurden Anforderungen an die Sammlung und weitere Entsorgung von EAG und Empfehlungen zu zielgerichteten Maßnahmen und Instrumenten zur besseren Nutzung bisher nicht ausgeschöpfter Potenziale zur Kreislaufführung von umwelt- und ressourcenrelevanten Metallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten erarbeitet.

Der Fokus der Untersuchung lag auf den EAG aus privaten Haushalten im Sinne des § 3 ElektroG. Weitere Elektrogeräte, die ebenfalls im Hinblick auf die Kreislaufführung von RePro-Metallen relevant sind, wurden im Projekt Recyclingpotenzial strategischer Metalle - ReStra (Forschungskennzahl 3711 93 339) (Sander et al. 2016) untersucht.

Alle Untersuchungen und Darstellungen beziehen sich auf die Situation vor Umsetzung des neuen ElektroG im Jahr 2015. Dementsprechend beziehen sich auch Definitionen wie z. B. die Sammelgruppen auf den Stand vor dem ElektroG des Jahres 2015.

2 Auswahl ressourcenrelevanter Metalle

Ziel dieses Arbeitsschrittes war die Identifizierung ressourcenrelevanter Metalle in Elektro- und Elektronikprodukten. Darunter werden Metalle verstanden, die sowohl eine hohe wirtschaftliche Bedeutung für die Elektro- und Elektronikindustrie als auch ein hohes Versorgungsrisiko aufweisen.

Ausgangspunkt der Untersuchung waren die zehn vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Metalle und Metallgruppen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens MaRess (2011) als besonders umweltrelevant und selten identifiziert worden waren, im folgenden „MaRess-Metalle“ genannt, (MaRess 2011), siehe folgende Liste:

- Gold,
- Silber,
- Palladium,
- Kobalt,
- Gallium,
- Indium,
- Zinn,
- Zink,
- Mangan,
- die Gruppe der Seltenen Erden (mit den 17 Metallen Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pm, Pr, Sc, Sm, Tb, Tm, Y und Yb).

Diese Metallliste wurde kritisch mit dem Ziel geprüft, die besonders ressourcenrelevanten Metalle für den Bereich der EAG-Verwertung als Basis für die weiteren Untersuchungen zu wählen und um weitere Metalle ergänzt.

2.1 Metallvorauswahl

Als Ausgangsbasis wurde eine Metallliste zusammengestellt, aus der anhand der Auswahlkriterien (siehe Kapitel 2.5) anschließend die „ressourcenrelevanten“ Metalle für das Vorhaben ausgewählt wurden. In die Metallliste wurden zunächst die erwähnten „MaRess-Metalle“ aufgenommen. Ergänzend wurden mehrere Studien zu kritischen Rohstoffen zu Rate gezogen, die sich bezüglich ihrer untersuchten Materialien, ihrer Methodik, ihres geografischen Fokus, ihres Zeithorizontes u. a. unterscheiden (Tabelle 5).

In einer Veröffentlichung vergleichen Erdmann und Graedel (2011) insgesamt zehn derartige Studien. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass vor allem Seltene Erden und Platingruppenmetalle als kritisch bewertet werden. Aber auch Wolfram, Niob, und Indium werden häufig als kritisch bezeichnet.

Andere Metalle wie z. B. Gold werden in den Studien nicht untersucht, weil sie unter dem Einfluss von Finanzspekulationen stehen; die Vorauswahl wird aber nicht in allen Studien nachvollziehbar dokumentiert.

Die Liste der vorausgewählten 22 Metalle (siehe Tabelle 6) entstand also aus der Kombination der vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Metalle, der in der Literatur als kritisch bewerteten Metalle (siehe Tabelle 5) und einem Austausch mit Erkenntnissen aus dem Arbeitsschritt zur Lokalisierung und Quantifizierung von ressourcenrelevanten Metallen in Elektro- und Elektronikgeräten (siehe Kapitel 3).

Einige Metalle wurden von der weiteren Betrachtung ausgenommen. Dies betraf

- Quecksilber (Hg), welches in der europäischen Quecksilberstrategie behandelt wird,
- Lithium, welches vom Fraunhofer-Institut ISI intensiv untersucht und als nicht kritisch erachtet wurde (Angerer et al.,2009a) und
- Magnesium, welches in Elektrogeräten nicht mengenrelevant bedeutsam ist.

Tabelle 5: Übersicht über die Auswahl kritischer Rohstoffe in den ausgewerteten Studien

Regionaler Zusammenhang	UK (2008) 69 Rohstoffe	USA (2008) 11 Rohstoffe	Bayern (2009) 39 Rohstoffe	EU (2008) 41 Rohstoffe	DE (2011) 13 Rohstoffe
Einstufung als „kritisch“	„hohes Risiko“ Au, PGM (Pt, Rh), Hg, Sr, Ag, Sb, Sn	„besonders kritisch„ In, Mn, PGM (Pd, Pt, Rh), Seltene Erden, Nb	„rote Gruppe“ SE (Y, Nd, Sc), Co, W, P, Nb, Se, Ge, PGM, Li, Cr, In, Mo	„kritisch“ Sb, Be, Co, Ge, Ga, In, Mg, PGM (Pt, Pd, Rh), Graphit, Ta, W, Seltene Erden, Nb, Flussspat	„höchste Kritikalität“ Ge, Re, Sb
Einstufung als „weniger kritisch“	„geringeres Risiko“ Co, Nb, V, Cu	„weniger kritisch“ Li, Cu, Ti, Ga, Ta, V	„orange Gruppe“ Au, Ag, Mg, Mn, Zn, Sn, Ti, Ta, Cu, Al, Ga „grüne Gruppe“ Ni, Pb, Fe	Insgesamt 41 Rohstoffe untersucht.	„hohe Kritikalität“ Ag, Bi, Cr, Ga, In, Nb, Pd, SE, Sn, W
Quelle	RPA (2008)	NRC (2008)	Bayern (2009)	EU (2010)	IZT/adelphi (2011)

Die folgende Tabelle 6 zeigt die ausgewählten Metalle in der Übersicht.

Tabelle 6: Metallliste als Ausgangspunkt für die Auswahl der ressourcenrelevanten Metalle

Metall	Motivation für Aufnahme in Metallliste
Gold	„MaRess-Metalle“ (MaRess (2011))
Silber	
Palladium	
Kobalt	
Gallium	
Indium	
Zinn	

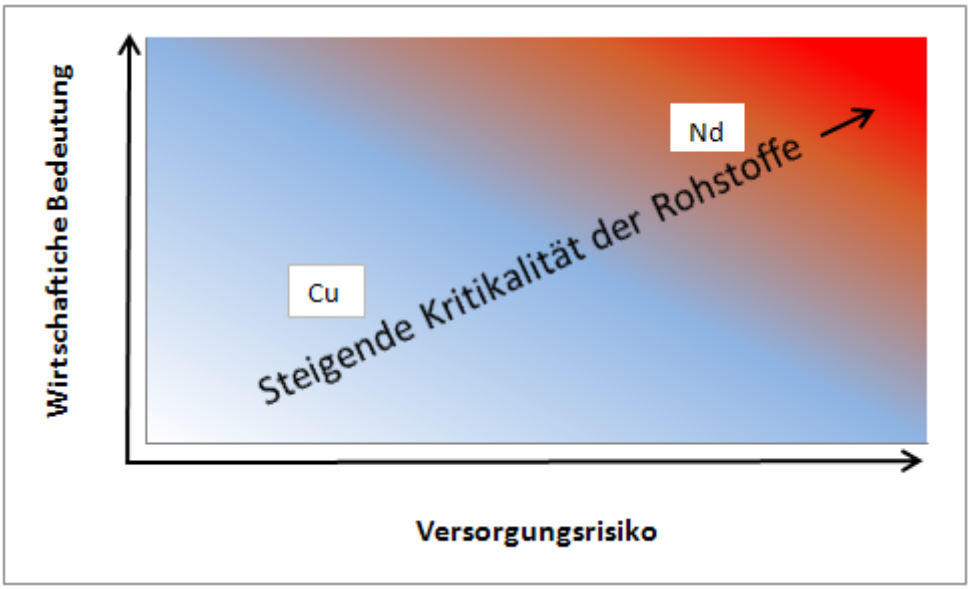
Metall	Motivation für Aufnahme in Metallliste
Zink	
Mangan	
Seltene Erden	
Antimon	IZT, EU, UK – je höchste Kritikalität
Beryllium	EU – „kritisch“
Germanium	Bayern, EU, IZT – je höchste Kritikalität
Kupfer	UK, USA, Bayern – je mittlere Kritikalität
Nickel	Ni wird neben Cr, Co, Mn, Mo, W, V von Japan bevorratet
Niob	USA, Bayern, EU – je höchste Kritikalität
Platin	UK, USA, Bayern, EU – je höchste Kritikalität
Rhenium	IZT – höchste Kritikalität
Rhodium	Siehe Platin
Tantal	EU – höchste Kritikalität, Bayern mittlere Kritikalität
Titan	USA, Bayern – je mittlere Kritikalität
Wolfram	EU – höchste Kritikalität, IZT – mittlere Kritikalität

(Erläuterung: Die Motivation bezieht sich auf die Einstufung in den Quellen der Tabelle 5)

2.2 Beurteilung der Ressourcenrelevanz von Metallen

Der Begriff Ressourcenrelevanz unterliegt keiner abschließenden Definition, sondern bezeichnet strategische Überlegungen der Ressourcensicherung, die für das vorliegende Vorhaben getroffen wurden. Für die Auswahl der strategisch wichtigen Metalle wurde das Konzept der Rohstoffkritikalitätsmatrix nach (Erdmann und Graedel, 2011) angewendet. Nach dieser Matrix setzt sich die Kritikalität eines Rohstoffs, definiert als die Unsicherheit über die Stabilität der gegenwärtigen oder zukünftigen Rohstoffversorgung, aus der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffs und dem Versorgungsrisiko bzw. der Verfügbarkeit eines Rohstoffs zusammen. Je höher das Versorgungsrisiko und je höher seine wirtschaftliche Bedeutung ist, umso kritischer wird die Versorgungslage des Rohstoffs (Abbildung 6).

Abbildung 6: Kritikalität von Rohstoffen: Wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko



Quelle: Erdmann und Graedel (2011)

Die Abschätzung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung wurden auf Basis der in anderen Kritikalitätsstudien angewandten Kriterien an die spezielle Ausrichtung des Vorhabens zur Auswahl der ressourcenrelevanten Metalle für die Elektro- und Elektronikgeräte angepasst. So wurde die wirtschaftliche Bedeutung der Rohstoffe hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Elektro(nik)branche bewertet. Außerdem die Umweltrelevanz in Form des kumulierten Energieaufwandes (KEA) der Rohstoffgewinnung einbezogen, zumal die Rohstoffverfügbarkeit auch von den mit der Rohstoffgewinnung bzw. -bereitstellung verknüpften Umweltbelastungen und seiner Rezyklierbarkeit zusammenhängen.

Um die Kriterien der Kritikalität jeweils zu einem Gesamtwert zu summieren, wurden vier dimensionslose Stufen festgelegt:

- 0,0 für keinen/fast keinen Beitrag,
- 0,3 für einen geringen Beitrag,
- 0,7 für einen hohen Beitrag,
- 1,0 für einen sehr hohen Beitrag.

Für die Bewertungsmaßstäbe wurde, soweit verfügbar, auf anderweitig in der Literatur genutzte Maßstäbe zurückgegriffen, insbesondere auf IZT/adelphi (2011). Im Folgenden werden die Kriterien und die Bewertungsmaßstäbe, wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko erläutert.

2.3 Wirtschaftliche Bedeutung für die Elektro- und Elektronikindustrie

2.3.1 Kriterium 1: Einsatz des Metalls in Elektro(nik)produkten

Als wesentliche Kenngröße wird der Einsatz der Metalle in Elektro(nik)produkten (EEG) herangezogen. Aufgrund des Projektrahmens wird nicht die globale Produktion des Roh-

stoffs, sondern nur der in EEG verwendete Anteil bewertet. Hierfür finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben in Prozent oder als Absolutwerte. Folgende Klassifizierung wurde angewandt:

- 1 für einen Anteil von EEG am Weltverbrauch von ≥ 40 %,
- 0,7 für einen Anteil von EEG am Weltverbrauch < 40 % und ≥ 10 %,
- 0,3 für einen Anteil von EEG am Weltverbrauch von < 10 % und ≥ 1 % und
- 0 für einen Anteil von EEG am Weltverbrauch von < 1 %.

2.3.2 Kriterium 2: Substituierbarkeit

Die Substituierbarkeit beschreibt, inwieweit ein Rohstoff ersetzt werden kann. Hierzu wird, wie in der Literatur beschrieben (IZT/adelphi (2011); EU (2010)), die Substituierbarkeit für die wesentlichen Rohstoffanwendungen in vier Klassen eingeteilt:

- 1 für fehlende Substituierbarkeit,
- 0,7 für Substituierbarkeit zu hohen Kosten und/oder mit Funktionalitätsverlust,
- 0,3 für Substituierbarkeit zu geringen Kosten und
- 0 für leichte und vollständige Substituierbarkeit ohne zusätzliche Kosten.

Diese Werte werden über alle Anwendungen gemittelt und geben einen allgemeinen Wert für die Substituierbarkeit des Metalls. Eine Bewertung ausschließlich der Substituierbarkeit in Elektro- und Elektronikprodukten wäre aus Sicht des Projektziels zwar wünschenswert gewesen, ließ sich jedoch aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit nicht realisieren.

2.3.3 Kriterium 3: Bedeutung für Zukunftstechnologien

Unter Zukunftstechnologien werden industriell verwertbare technische Fertigkeiten verstanden, die Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren hinaus auslösen, wie z. B. die Elektromobilität (Angerer et al. (2009a); Elsner et al. (2010)). Von diesen global anwendbaren Technologien wird erwartet, dass ihr Marktwachstum viel schneller ist, als das allgemeine Wirtschaftswachstum. Auch die Versorgung mit diesen Rohstoffen kann limitierend sein oder ein Versorgungsengpass kann die Marktdurchdringung der Zukunftstechnologie behindern. Nach IZT/adelphi (2011) werden für die Zukunftstechnologien folgende dimensionslose Klassen gebildet:

- 1 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von ≥ 200 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (sehr sensitiv),
- 0,7 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen
  < 200 % und ≥ 100 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (sensitiv),
- 0,3 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen
  < 100 % und ≥ 50 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (intensiv) und
- 0 für einen globalen Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von
  < 50 % der globalen Rohstoffproduktion (2008) (unkritisch).

2.3.4 Weitere Kriterien

Zusätzlich ist in der Ergebnisdarstellung auch die Preisentwicklung für die Jahre 2001 und 2010 dargestellt. Der Preis wird von Angebot und Nachfrage sowie von Spekulationsgeschäften bestimmt. Letztere können zu starken Preisschwankungen unabhängig von der realen Versorgungslage führen, weshalb die Preisentwicklung nicht als bedeutendes Kriterium eingerechnet wurde.

2.4 Versorgungsrisiko

Die Risiken der Rohstoffversorgung liegen in

- geopolitischen Risiken, z. B. der Konzentration der Förderung auf wenige Länder oder der politischen Stabilität der Förderländer,
- Marktrisiken, wie der Konzentration der Produktion auf wenige Unternehmen oder geoökonomische Aspekte wie das Verhältnis von globalen Reserven zu globaler Produktion (statische Reichweite) sowie
- Strukturrisiken, wie dem Anteil der Gewinnung als Nebenprodukt.

Zudem bestimmen umweltbezogene Kriterien die Versorgung. Das gesteigerte gesellschaftliche Interesse an ökologisch- und sozialverträglicher Rohstoffgewinnung beeinflusst das Verhalten der Marktakteure und somit auch die Verfügbarkeit der Rohstoffe. Eine Internalisierung der Kosten der negativen Umwelt- und Sozialwirkungen würde die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der Rohstoffförderung ebenfalls verändern.

Als umweltbezogene Aspekte des Versorgungsrisikos werden im Rahmen dieses Vorhabens zudem die Umweltbelastungen bei der Rohstoffgewinnung und –verarbeitung sowie die Rezyklierbarkeit und die Recyclingrate gezählt:

- die Umweltbelastungen bei der Rohstoffgewinnung und –verarbeitung,
- die Rezyklierbarkeit sowie
- die Recyclingrate.

Während die Kriterien für die wirtschaftliche Bedeutung auf die Elektro- und Elektronikindustrie ausgerichtet wurden, erfolgte die Bewertung des Versorgungsrisikos branchenunabhängig. Für die Bestimmung des Versorgungsrisikos waren die im Folgende aufgelisteten Kriterien maßgeblich.

2.4.1 Kriterium 1: Länderkonzentration der Reserven

Die Werte für den Indikator Länderkonzentration der Reserven wurden direkt aus der IZT/adelphi Studie (2011) entnommen und für Gold und Rhodium aus Angaben in USGS (2012) ergänzt. Es wird dabei die Konzentration der Reserven in den drei Ländern mit den größten Reserven addiert und zu den Gesamtreserven ins Verhältnis gesetzt. Einer maximalen Länderkonzentration entspricht der Wert 1, eine minimale Länderkonzentration tendiert gegen 0.

2.4.2 Kriterium 2: Länderrisiko globale Produktion

Die Versorgungssicherheit ist auch von der politischen Lage und den strategischen Entscheidungen der rohstoffgewinnenden Länder abhängig. Zur Bestimmung des Länderrisikos werden die Daten von IZT/adelphi (2011) genutzt, bei denen die Produktionsanteile der drei globalen Hauptproduktionsländer mit den Risikofaktoren der Worldwide

Governance Indikatoren der Weltbank, WGI (2012), (im Hinblick auf den Einfluss der operativen Regierungsführung auf die Rohstoffgewinnung und -bereitstellung) und eventuellen Exportrestriktionen (OECD) gleichwertig gewichtet und zu einem Gesamtrisiko mit Werten zwischen 0 (minimales Risiko) und 1 (maximales Risiko) addiert wurden.

2.4.3 Kriterium 3: Firmenkonzentration der globalen Produktion

Die Firmenkonzentration gibt einen Hinweis darauf, inwieweit Mono- oder Oligopole Rohstoffangebote und -preise beeinflussen. Es werden die Daten der IZT/adelphi Studie (2011) genutzt, in welcher für jedes Metall die Produktionsanteile der drei Unternehmen mit den größten Produktionsanteilen addiert werden. Da in der IZT/adelphi Studie keine Daten für Gold und Rhodium vorlagen, wurden diese abgeschätzt. Einer maximalen Unternehmenskonzentration entspricht der Wert 1, einer minimalen Unternehmenskonzentration ein Wert, der gegen 0 tendiert.

2.4.4 Kriterium 4: Anteil der Nebenproduktion

Die Produktion vieler Metalle, die als Nebenprodukte gewonnen werden, hängt von den Hauptprodukten und deren Nachfrageentwicklung ab. Wächst die Nachfrage nach Nebenprodukten dauerhaft stärker als nach dem Hauptprodukt, so führt dies entweder zu sehr starken Preissteigerungen für das Nebenprodukt, weil es zum Hauptprodukt wird und die Verarbeitung der Rohstoffquelle nicht mehr in dem bisherigen Maße über das bisherige Hauptprodukt kofinanziert wird oder/und es kommt zu Lieferengpässen. Somit besteht für Rohstoffe, die ausschließlich als Nebenprodukte anderer Rohstoffe gewonnen werden, ein höheres Versorgungsrisiko.

Der Indikator nach IZT/adelphi (2011) gibt an, zu welchen Anteilen ein Rohstoff im globalen Maßstab als Haupt- oder Nebenprodukt gewonnen wird. Der Indikator kann folgende Werte annehmen:

- 1 für ausschließliche Nebenproduktion,
- 0,7 für überwiegende Nebenproduktion,
- 0,3 für überwiegende Hauptproduktion und
- 0 für ausschließliche Hauptproduktion.

2.4.5 Kriterium 5: Recyclingfähigkeit

Die Klassifizierung der Recyclingfähigkeit eines Rohstoffs in einer Anwendung kann folgende Werte annehmen, wobei hohe Recyclingfähigkeiten niedrigen Kennzahlen zugeordnet werden:

- 1 für physikalisch-chemisch nahezu unmögliches Recycling,
- 0,7 für Recycling möglich zu hohen Kosten und/oder bei Qualitätsverlust,
- 0,3 für Recycling möglich zu geringen Kosten und
- 0 für Metalle, bei denen bereits derzeit in Deutschland aufgrund ökonomischer Treiber und bestehender Technologien ein Recycling erfolgt.

In Anlehnung an die Substituierbarkeit erfolgt in IZT/adelphi (2011) die Berechnung, indem die Anteile eines Rohstoffs in seinen wesentlichen Verwendungen mit spezifischen Faktoren für die Recyclingfähigkeit gewichtet werden. Beispielsweise wird 71 % des verwendeten Antimons in Flammschutzmitteln eingesetzt, aus welchen derzeit kein Recycling von Antimon erfolgt. Es wäre aber möglich, bestimmte Geräteteile, wie etwa

Fernsehergehäuse oder EDV, vorzusortieren und Antimon zurückzugewinnen. Der Wert für diese Recyclingfähigkeit wird in der von IZT/adelphi (2011) verwendeten Tabelle mit 0,7 angegeben (Erdmann, 2012). Weitere fünf Prozent des verwendeten Antimons werden in Gläsern eingesetzt, aus welchen Antimon nicht zurückgewonnen werden kann (Kennzahl der Recyclingfähigkeit = 1). Unter den weiteren Anwendungen sind Legierungsmetalle, aus denen Antimon mit hoher Wirtschaftlichkeit recycelt werden kann (Faktor 0,3).

2.4.6 Kriterium 6: Recyclingquote

Als Vergleichswert zum zukunftsorientierten Indikator Recyclingfähigkeit, der das Recyclingpotenzial abbildet, wird auch die zum Projektbeginn im Jahr 2011 erzielte Recyclingquote einbezogen. Hierzu werden Werte von UNEP (2011) verwendet und wie folgt klassifiziert. Auch hier entspricht eine hohe Recyclingquote einer niedrigen Kennzahl.

- 1 für End of life Recycling < 1 %,
- 0,7 für End of life Recycling ≥ 1 und < 10 %,
- 0,3 für End of life Recycling ≥ 10 und < 50 %,
- 0 für End of life Recycling ≥ 50 %.

2.4.7 Kriterium 7: Umweltrelevanz der Rohstoffbereitstellung (KEA)

Für die Umweltrelevanz der Rohstoffbereitstellung wird der Kumulierte Energieaufwand (KEA) von der Entnahme des Rohstoffs bis zur Bereitstellung in Deutschland verwendet. Giegrich et al. (2012) konnten zeigen, dass der KEA in erster Näherung die Umweltbelastung wiederspiegelt. Ausgehend von den ermittelten spezifischen KEA für die Metalle (in MJ/t) wurde für jedes Metall der weltweite und absolute kumulierte Energieaufwand (TJ/a) berechnet. Die Ergebnisse wurden wie folgt klassifiziert:

- 1 für einen KEA der Weltproduktion des Metalls> 500.000 TJ/a,
- 0,7 für einen KEA der Weltproduktion des Metalls ≥ 100.000 bis 500.000 TJ/a,
- 0,3 für einen KEA der Weltproduktion des Metalls ≥ 10.000 bis 100.000 TJ/a,
- 0 für einen KEA der Weltproduktion des Metalls < 10.000 TJ/a.

Für Antimon, Beryllium, Germanium, Metalle der Seltenen Erden, Niob und Rhenium konnten keine Daten für den kumulierten Energieaufwand ermittelt werden. Hier wurden unter den folgenden Annahmen spezifische KEA-Werte (pro t Metall) von anderen Metallen übernommen.

Der spezifische KEA von Antimon entspricht ungefähr dem spezifischen KEA von Kupfer, da Antimon ebenso wie Kupfer vor allem aus sulfidischen Lagerstätten gefördert wird, deshalb einem Röstungsprozess unterworfen werden muss und reineres, 99,9 %iges Antimon durch elektrolytische Raffination wie beim Kupfer erhalten wird, vgl. Römpp (2012).

Der spezifische KEA von Beryllium entspricht ungefähr dem KEA von Gold, da Beryllium über ähnliche Aufschlussverfahren gewonnen wird. Die Be-Minerale werden über komplexe Fluoride oder über Sulfate aufgeschlossen und hieraus $Be(OH)_2$ hergestellt, welches dann nach Überführung in $BeCl_2$ bzw. BeF_2 durch Elektrolyse oder Reduktion mit Magnesium in reines Beryllium umgesetzt wird (Römpp (2012)).

Der spezifische KEA von Germanium entspricht ungefähr dem KEA von Kupfer, da Germanium ein Nebenprodukt der Kupfergewinnung ist, daneben aber auch bei der Gewinnung anderer Metalle (Zink, Blei). Der weitere Energieaufwand zur Gewinnung von sehr reinem Germanium für die Elektronik durch Zonenschmelzen wird hier nicht betrachtet.

Der spezifische KEA von Metallen Seltener Erden wird in einer worst-case-Betrachtung als so groß wie für Silber (ca. 1.700 MJ/kg) angenommen.

Der spezifische KEA von Niob entspricht ungefähr dem KEA von Tantal, da Niob mit Tantal vergesellschaftet in Lagerstätten vorkommt. Die Aufarbeitung der Tantalerze erfolgt durch nasschemischem Aufschluss mit Flusssäure, mit Hilfe von Salzschmelzen oder durch Chlorierung. Zur Trennung des Tantals von Niob wird überwiegend die Flüssig-flüssig-Extraktion mit 4-Methylpentan-2-one oder die Destillation der Pentachloride eingesetzt (Römpp (2012); Lassner et al. (1999)).

2.5 Gewichtung der Auswahlkriterien

Die Gewichtung der Kriterien innerhalb der beiden Dimensionen „Wirtschaftliche Bedeutung“ und „Versorgungsrisiko“ erfolgte in Anlehnung an vorliegende Studien.

Kernpunkte der Überlegungen waren dabei, dass beim Versorgungsrisiko langfristige Indikatoren und die Umweltrelevanz schwerer wiegen als kurzfristige (z. B. Firmenkonzentration) und auch der Einfluss der Haupt- bzw. Nebenproduktion höher zu gewichten ist. Bei der wirtschaftlichen Bewertung lag der Schwerpunkt vorhabensgemäß auf der Bedeutung für die Elektronikindustrie.

Tabelle 7: Gewichtung der Auswahlkriterien zur wirtschaftlichen Bedeutung

Wirtschaftliche Bedeutung	Gewichtung
Einsatz in Elektro(nik)produkten	50 %
Substituierbarkeit	25 %
Bedeutung für Zukunftstechnologien	25 %

Tabelle 8: Gewichtung der Auswahlkriterien zum Versorgungsrisiko

Versorgungsrisiko	Gewichtung
Länderkonzentration Reserven	15 %
Länderrisiko Produktion	10 %
Firmenkonzentration	10 %
Haupt-/Nebenprodukt	15 %
Umweltrelevanz (KEA)	30 %
Recyclingfähigkeit	15 %
Recyclingquote	5 %

2.6 Datenerhebung zu den Kriterien und Metallen

Für die vorausgewählten 22 Metalle (aus Tabelle 6) wurden die Daten der Kriterien zur wirtschaftlichen Bedeutung und zum Versorgungsrisiko (Kapitel 2.3 und 2.4) mit Stand im Jahr 2011 (Projektbeginn) recherchiert und in die dimensionslosen Kennzahlen umgerechnet. Die Kennzahlen wurden entsprechend Tabelle 7 und Tabelle 8 gewichtet und

zu den Ergebnisgrößen für wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko summiert, siehe Abbildung 7 und Abbildung 8.

Außerdem wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse innerhalb des Versorgungsrisikos die Umweltrelevanz stärker gewichtet (50 % statt 30 %), vgl. Abbildung 9. Auf diesem Wege erhielten Rohstoffe mit einer sehr umweltrelevanten Primärgewinnung (Gold, Kupfer, Mangan, Titan, Zink) ein höheres Versorgungsrisiko.

Abbildung 7: Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung für die Elektrobranche (MaRess-Metalle rot markiert)

	Wirtschaftliche Bedeutung												
	Produktion	Einsatzmenge in Elektronikprodukten	Einsatzmenge in Elektronikprodukten	Preise 2001	Preise 2009	Preise 2010	Preissteigerung (2001-2010)	Substituierbarkeit	Substituierbarkeit Elctronik and IT	Zukunftstechnologien (Globaler Nachfrageimpuls)	Zukunftstechnologien (Globaler Nachfrageimpuls)	Summe wirtschaftliche Bedeutung	
Gewichtung		50%						25%			25%	100%	
Einheit	t	%	-	US-D/kg	US-D/kg	US-D/kg	%	-	-		-		
1 Antimon	197.000	50,0%	1,0	1,4	5,2	8	471	0,64		unkritisch	0	0,66	Sb
2 Beryllium	141	40,0%	1,0	152	340	506	233	0,79		sensitiv	0,7	0,87	Be
3 Cobalt	75.900	27,0%	0,7	23,3	34,2	32,2	38	0,90		intensiv	0,3	0,65	Co
4 Gallium	78	65,4%	1,0	650	449	670	3	0,74		sehr sensitiv	1	0,94	Ga
5 Germanium	138	15,2%	0,7	900	940	950	6	0,80		sehr sensitiv	1	0,80	Ge
6 Gold	2450	12,0%	0,7	8.500	31.300	52.350	516	0,74	1	intensiv	0,3	0,61	Au
7 Indium	570	73,7%	1,0	120	500	550	358	0,90	0,3	sehr sensitiv	1	0,98	In
8 Kupfer	15.900.000	4,0%	0,3	1,8	5,3	7,5	317	0,56	0,7	intensiv	0,3	0,37	Cu
9 Mangan	10.800.000	0,1%	0,0	0,529	1,37	3,3	524	1,00		unkritisch	0	0,25	Mn
10 Nickel	1.480.000	3,0%	0,3	5,9	14,6	19,5	231	0,90	0,7	intensiv	0,3	0,45	Ni
11 Niob	62.900	0,1%	0,0	19,7		42	113	0,70		unkritisch	0	0,18	Nb
12 Palladium	220	19,1%	0,7	12.000		21.700	81	0,75	1	intensiv	0,3	0,61	Pd
13 Platin	445	6,0%	0,3	19.800	11600	55034	178	0,75	1	sensitiv	0,7	0,51	Pt
14 Rhenium	46	0,1%	0,0	950	2.100	2300	142	0,84		sensitiv	0,7	0,39	Re
15 Rhodium	25	0,8%	0,0	51.441		74910	46	0,75	1	sensitiv	0,7	0,36	Rh
16 Seltene Erden	133.000	1,2%	0,3	5,8	11,1	11,1	91	0,87		sehr sensitiv	1	0,62	SE
17 Silber	21800	23,0%	0,7	140	472	552	294	0,71		intensiv	0,3	0,60	Ag
18 Tantal	1160	60,0%	1,0	73,1	99,5	400	447	0,40		intensiv	0,3	0,68	Ta
19 Titan	7.035.000	0,1%	0,0	7,8	13,9	13,9	78	0,32		unkritisch	0	0,08	Ti
20 Wolfram	63.000	1,0%	0,3	65		250	285	0,77		intensiv	0,3	0,42	W
21 Zink	12.050.000	0,1%	0,0	0,97	1,72	2,28	135	0,30		unkritisch	0	0,08	Zn
22 Zinn	260.000	23,0%	0,7	6,94	14,2	26,1	276	0,82		intensiv	0,3	0,63	Sn
Bezugsjahr	2011	2009	2009	2011	2009	2011	2011	2008	2009	2010	2010		
Literatur	IZT	EU	EU	IZT	USGS	IZT	IZT	IZT	EC 2010	IZT	IZT		

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 8: Berechnung des Versorgungsrisikos (MaRess-Metalle rot markiert)

	Versorgungsrisiko												
	Länderkon-zentration der Reserven	Länder-risiko globale Produktion	Firmenkon-zentration der glob. Produktion	Neben-/Haupt-produkte	Neben-/Haupt-produkte	Recycling-fähigkeit	Recycling-quote heute	Recycling-quote heute	Umwelt-relevanz (spez. KEA)	Umwelt-relevanz (KEA)	Umwelt-relevanz (KEA)	Summe Versorgungs-risiko	
Gewichtung	15%	10%	10%		15%	15%		5%			30%	100%	
Einheit	-	-	-		-	-	%	-	MJ/t	TJ	-		
1 Antimon	0,74	0,76	0,51	überw. HP	0,3	0,67	1-10 %	0,7	50.438	9.936	0,0	0,42	Sb
2 Beryllium	0,8	0,14	1	überw. HP	0,3	0,78	< 1%	1	261.210.200	36.831	0,3	0,54	Be
3 Cobalt	0,82	0,21	0,16	überw. NP	0,7	0,58	> 50%	0	103.009	7.818	0,0	0,35	Co
4 Gallium	0,58	0,14	0,5	nur NP	1	0,84	< 1%	1	2.706.710	211	0,0	0,48	Ga
5 Germanium	0,46	0,61	0,71	nur NP	1	0,67	< 1%	1	50.438	7	0,0	0,50	Ge
6 Gold	0,46	0,58	0,28	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	261.210.200	639.965	1,0	0,58	Au
7 Indium	0,37	0,48	0,56	nur NP	1	0,71	<1%	1	1.981.627	1.130	0,0	0,47	In
8 Kupfer	0,48	0,08	0,31	überw. HP	0,3	0,34	>50 %	0	50.438	801.964	1,0	0,51	Cu
9 Mangan	0,66	0,19	0,25	nur HP	0	0,34	>50 %	0	48.016	518.573	1,0	0,49	Mn
10 Nickel	0,56	0,17	0,46	überw. HP	0,3	0,36	>50 %	0	157.771	233.501	0,7	0,46	Ni
11 Niob	0,68	0,24	0,99	überw. HP	0,3	0,66	>50 %	0	3.355.827	211.082	0,7	0,58	Nb
12 Palladium	0,99	0,44	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	143.552.174	31.581	0,3	0,54	Pd
13 Platin	0,99	0,26	0,66	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	213.608.641	95.056	0,3	0,46	Pt
14 Rhenium	0,8	0,13	0,8	nur NP	1	0,54	>50 %	0	- *	-	-	0,44	Re
15 Rhodium	0,99	0,59	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	467.871.970	11.697	0,3	0,56	Rh
16 Seltene Erden	0,69	0,76	0,76	überw. HP	0,3	0,75	<1%	1	1.668.287	221.882	0,7	0,67	SE
17 Silber	0,46	0,19	0,18	überw. NP	0,7	0,41	>50 %	0	1.668.287	36.369	0,3	0,36	Ag
18 Tantal	0,73	0,12	0,61	nur HP	0	0,63	<1%	1	3.355.827	3.893	0,0	0,33	Ta
19 Titan	0,61	0,61	0,43	nur HP	0	0,22	>50 %	0	417.783	2.939.103	1,0	0,53	Ti
20 Wolfram	0,78	0,65	0,5	nur HP	0	0,45	>10-25 %	0,3	52.412	3.302	0,0	0,31	W
21 Zink	0,37	0,14	0,2	nur HP	0	0,53	>50 %	0	42.271	509.366	1,0	0,47	Zn
22 Zinn	0,53	0,25	0,4	nur HP	0	0,63	>50 %	0	263.923	68.620	0,3	0,33	Sn
									* nicht bestimmt				
Bezugsjahr	2008	2008	2008	2008		2008	2011	2011	2012	2012			
Literatur	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	UNEP	UNEP	Texte	Texte			

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 9: Berechnung des Versorgungsrisikos, Sensitivität mit Umweltrelevanz 50 % (MaRess-Metalle rot markiert)

		Versorgungsrisiko												
		Länderkon-zentration der Reserven	Länder-risiko globale Produktion	Firmenkon-zentration der glob. Produktion	Neben-/Haupt-produkte	Neben-/Haupt-produkte	Recycling-fähigkeit	Recycling-quote heute	Recycling-quote heute	Umwelt-relevanz (spez. KEA)	Umwelt-relevanz (KEA)	Umwelt-relevanz (KEA)	Summe Versorgungs-risiko	
	Gewichtung	11%	7%	7%		11%	11%		4%			50%	100%	
	Einheit	-		-		-	-	%	-	MJ/t	TJ	-		
1	Antimon	0,74	0,76	0,51	überw. HP	0,3	0,67	1-10 %	0,7	50.438	9.936	0,0	0,30	Sb
2	Beryllium	0,8	0,14	1	überw. HP	0,3	0,78	< 1%	1	261.210.200	36.831	0,3	0,47	Be
3	Cobalt	0,82	0,21	0,16	überw. NP	0,7	0,58	> 50%	0	103.009	7.818	0,0	0,25	Co
4	Gallium	0,58	0,14	0,5	nur NP	1	0,84	< 1%	1	2.706.710	211	0,0	0,34	Ga
5	Germanium	0,46	0,61	0,71	nur NP	1	0,67	< 1%	1	50.438	7	0,0	0,36	Ge
6	Gold	0,46	0,58	0,28	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	261.210.200	639.965	1,0	0,70	Au
7	Indium	0,37	0,48	0,56	nur NP	1	0,71	<1%	1	1.981.627	1.130	0,0	0,33	In
8	Kupfer	0,48	0,08	0,31	überw. HP	0,3	0,34	>50 %	0	50.438	801.964	1,0	0,65	Cu
9	Mangan	0,66	0,19	0,25	nur HP	0	0,34	>50 %	0	48.016	518.573	1,0	0,64	Mn
10	Nickel	0,56	0,17	0,46	überw. HP	0,3	0,36	>50 %	0	157.771	233.501	0,7	0,53	Ni
11	Niob	0,68	0,24	0,99	überw. HP	0,3	0,66	>50 %	0	3.355.827	211.082	0,7	0,61	Nb
12	Palladium	0,99	0,44	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	143.552.174	31.581	0,3	0,47	Pd
13	Platin	0,99	0,26	0,66	überw. HP	0,3	0,53	>50 %	0	213.608.641	95.056	0,3	0,41	Pt
14	Rhenium	0,8	0,13	0,8	nur NP	1	0,54	>50 %	0	- *	-	-	0,32	Re
15	Rhodium	0,99	0,59	0,77	überw. NP	0,7	0,53	>50 %	0	467.871.970	11.697	0,3	0,48	Rh
16	Seltene Erden	0,69	0,76	0,76	überw. HP	0,3	0,75	<1%	1	1.668.287	221.882	0,7	0,68	SE
17	Silber	0,46	0,19	0,18	überw. NP	0,7	0,41	>50 %	0	1.668.287	36.369	0,3	0,34	Ag
18	Tantal	0,73	0,12	0,61	nur HP	0	0,63	<1%	1	3.355.827	3.893	0,0	0,23	Ta
19	Titan	0,61	0,61	0,43	nur HP	0	0,22	>50 %	0	417.783	2.939.103	1,0	0,66	Ti
20	Wolfram	0,78	0,65	0,5	nur HP	0	0,45	>10-25 %	0,3	52.412	3.302	0,0	0,22	W
21	Zink	0,37	0,14	0,2	nur HP	0	0,53	>50 %	0	42.271	509.366	1,0	0,62	Zn
22	Zinn	0,53	0,25	0,4	nur HP	0	0,63	>50 %	0	263.923	68.620	0,3	0,32	Sn
										* nicht bestimmt				
	Bezugsjahr	2008	2008	2008	2008		2008	2011	2011	2012	2012			
	Literatur	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	IZT	UNEP	UNEP	Texte	Texte			

Quelle: eigene Darstellung

2.7 Bewertung und Auswahl der ressourcenrelevanten Metalle

Als Ergebnis der Bewertung sind in Abbildung 10 die wirtschaftliche Bedeutung und das Versorgungsrisiko der 22 Metalle dargestellt. Je weiter rechts die Metalle angeordnet sind, desto höher ist das Versorgungsrisiko bzw. je weiter oben, desto größer die wirtschaftliche Bedeutung für die Elektro(nik)branche.

Grundsätzlich sind sämtliche Metalle mit einer wirtschaftlichen Bedeutung für die Elektro(nik)branche von über 0,5 und einem Versorgungsrisiko von mindestens 0,3 ressourcenrelevant.

Bis auf Zink und Mangan haben die Metalle der Vorauswahl eine wirtschaftliche Bedeutung für die Elektronikindustrie in Höhe von dimensionslosen Werten von 0,6 oder höher. Zink und Mangan haben eine deutlich geringere wirtschaftliche Bedeutung (0,08 bzw. 0,25), da sie beide nur in sehr geringen Anteilen in EEG eingesetzt werden (< 0,1 % der jährlichen Produktion). Sie werden daher im vorliegenden Projekt nicht weiter betrachtet.

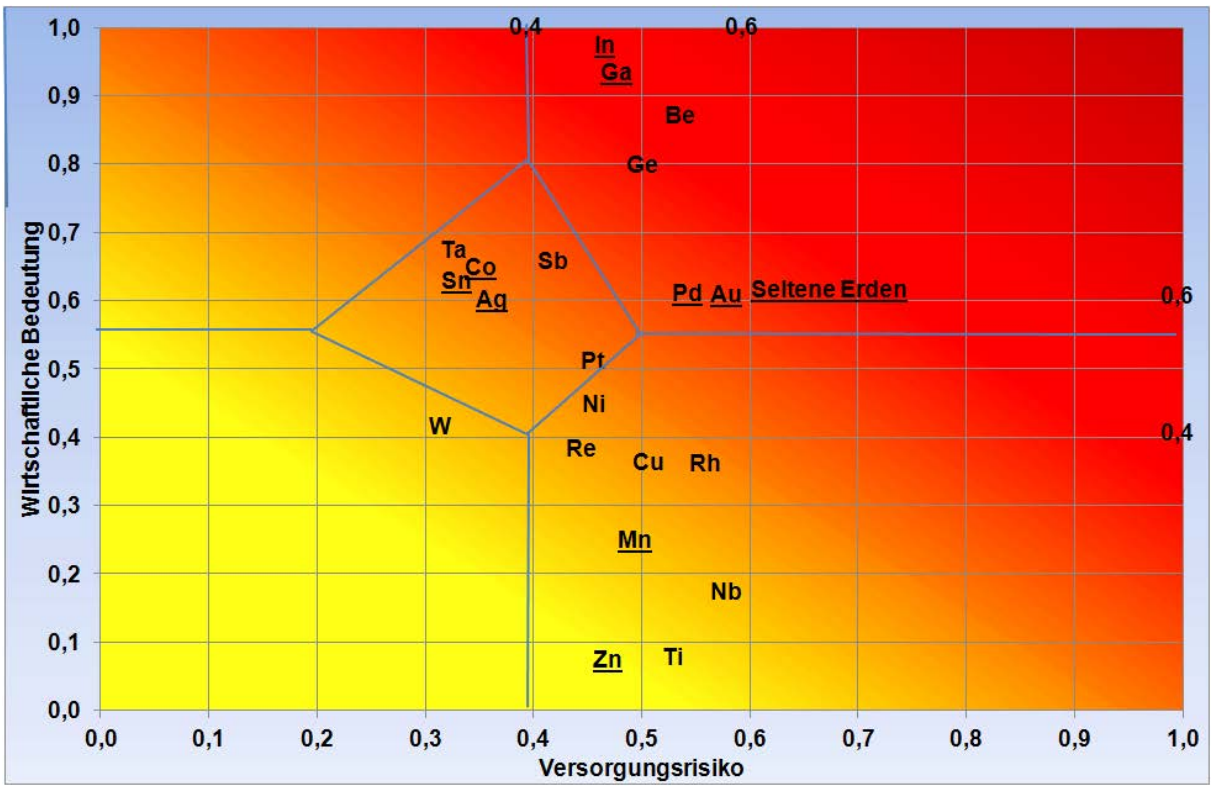
Zusätzlich werden folgende Metalle als ressourcenrelevant erachtet:

- Tantal wird insbesondere aufgrund seiner hohen wirtschaftlichen Bedeutung für die Kondensatorenherstellung ausgewählt.
- Beryllium findet als Spezialmetall mit geringem Gewicht und großer Härte Verwendung, beispielsweise in CT und Röntgengeräte sowie in der Raumfahrt.
- Antimon wird zu über 70 % als Flammschutzmittel eingesetzt und kann aus diesem Anwendungsbereich nicht mit den gleichen Rückgewinnungsroutinen behandelt werden, wie andere Metalle. Daher wird für dieses Element eine gesonderte Bearbeitungsmethodik gewählt (siehe Abschnitt 2.9).

Folgende Metalle wurden im Rahmen des Vorhabens nicht betrachtet:

- Germanium wird vorwiegend in Produkten, die für militärische Zwecke bestimmt sind, sowie Fotovoltaik eingesetzt. Erstere unterliegen nicht dem Anwendungsbereich des ElektroG, letztere werden in einem anderen Projekt im Auftrag des UBA betrachtet (Sander et al. 2016)
- Auch Platin (EE-Anteil 6 %) wird nicht weiter explizit betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass die Platinrückgewinnung bei der angestrebten Rückgewinnung von anderen Edelmetallen abgedeckt wird.

Abbildung 10: Ergebnis der Ermittlung von wirtschaftlicher Bedeutung (für Elektrogeräte) und Versorgungsrisiko für 22 Metalle



Quelle: eigene Darstellung

Bei der Einstufung der Metalle Seltener Erden ist zu beachten, dass sie als Gruppe betrachtet werden, d. h., ihre Produktionsmenge geht als Ganzes in die Berechnung des kumulierten Energieaufwandes ein, welcher zu 30 % das Versorgungsrisiko bestimmt. Betrachtet man nur Neodym mit einem Anteil von ca. 17 % der Produktion oder Yttrium mit ca. 4 %, so reduziert sich die Summe des Versorgungsrisikos von 0,67 auf 0,55 bzw. 0,46.

2.8 Liste der RePro-Metalle

Als Ergebnis des beschriebenen Auswahlverfahrens entstand eine Liste von Metallen, die im Folgenden als RePro-Metalle bezeichneten werden (Tabelle 9). Stellvertretend für die 17 Metalle der Seltenen Erden wurden Neodym und Yttrium ausgewählt. Die RePro-Metalle erstrecken sich über mehrere Gruppen des Periodensystems der Elemente (Abbildung 11).

Tabelle 9: Ausgewählte ressourcenrelevante Metalle (RePro-Metalle)

Metalle	Bemerkung
Gold Silber Palladium Kobalt Gallium Indium Zinn	Vorauswahl
Neodym Yttrium	Neodym: Leitmetall für leichte Seltene Erden; Yttrium: Leitmetall für schwere Seltene Erden
Tantal	Hohe wirtsch. Bedeutung für Elektro- und Elektronikindustrie
Antimon	Flammschutzmittel, andere Rückgewinnungsroutinen.
Beryllium	Legierungselement Kupfer, medizinische Produkte.

Abbildung 11: Übersicht RePro-Metalle (orange) im Periodensystem

Wasserstoff																Helium
Lithium	Beryllium											Bor	Kohlenstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Fluor	Neon
Natrium	Magnesium											Aluminium	Silizium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon
Kalium	Calcium	Scandium	Titanium	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Kobalt	Nickel	Kupfer	Zink	Gallium	Germanium	Arsen	Selen	Brom	Krypton
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niob	Molybdän	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium	Indium	Zinn	Antimon	Tellur	Jod	Xenon
Caesium	Barium	* Lutetium	Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksilber	Thallium	Blei	Wismut	Polonium	Astat	Radon
Francium	Radium	** Lawrencium	Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Meitnerium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium	Ununtrium	Ununquadium	Ununpentium	Ununhexium	Ununseptium	Ununoctium
		* Lanthanide: Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium		
		** Actinide: Actinium	Thorium	Protactinium	Uran	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium		

Quelle: eigene Darstellung

2.9 Beryllium und Antimon

Für die Elemente Beryllium und Antimon lagen zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Studie nur schwache Datengrundlagen vor. Daher konnte lediglich eine summarische Bearbeitung dieser Elemente erfolgen. Im Folgenden werden die wirtschaftliche Bedeutung dieser Elemente im Bereich der Elektro(nik)geräte, Aspekte der Toxizität sowie die derzeitigen Entsorgungspfade für Beryllium und Antimon zusammengefasst.

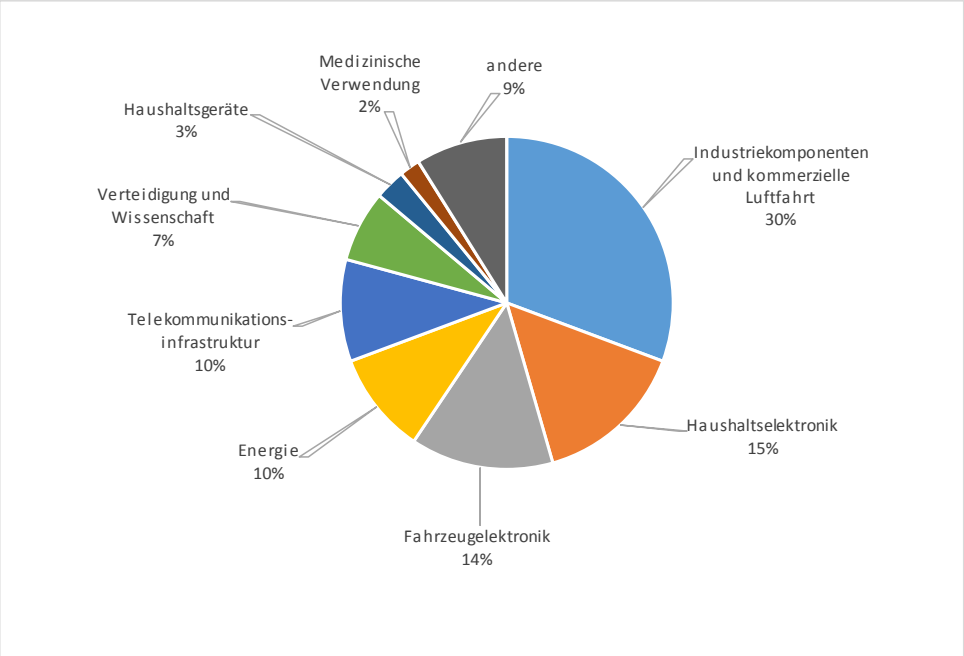
2.9.1 Beryllium

2.9.1.1 Anwendungsfelder

Weltweit wurden im Jahr 2012 410 t Beryllium produziert. Davon waren 80 t Beryllium-Metall und 330 t Berylliumlegierungen mit einem Be-Gehalt zwischen 0,2 und 2 %.

Eine Übersicht über die weltweite Verteilung des Verbrauchs über die verschiedenen Anwendungsfelder gibt Abbildung 12.

Abbildung 12: Anwendungsfelder von Beryllium



Quelle: Datengrundlage BeST (2015), eigen Darstellung

Der weitaus größte Teil wird in elektrischen Anwendungen genutzt, von denen relevante Anteile nicht in das Anwendungsgebiet des ElektroG fallen (Verteidigung, Wissenschaft, Energie, Fahrzeugelektronik Infrastruktur Telekommunikation, Industriekomponenten, Luftfahrt). Ca. 20 % werden in Geräten des Anwendungsbereichs des ElektroG genutzt.

Die Hauptabnahmeländer der EU (Deutschland, Italien und Frankreich) verbrauchten ca. 30 t, Deutschland alleine etwa 22 t[5] (BeST 2015). Knudson (2008) gibt an, dass 11,5 t Beryllium in Produkten enthalten sind, die als Elektrogeräte in Europa verbraucht werden.

Metallisches Beryllium und Berylliummischungen (Be-Gehalt > 60 %) werden in Europa in Mengen von 2-10 Tonnen pro Jahr verwendet, davon 0,2 t in elektrischen und elektronischen Geräten. Bei Berylliumlegierungen (Be-Gehalt 0,15-2 %) liegt die Verwendungsmenge zwischen 50 und 55 t/a, von denen 25-28 t/a in elektrischen und elektronischen Geräten verwendet werden (Gensch et al. 2014).

Tabelle 10 zeigt Spannbreiten in den Be-Konzentrationen in verschiedenen Legierungen auf.

Tabelle 10: Berylliumkonzentrationen in verschiedenen Legierungen

Legierung	Berylliumgehalt
Bonddrähte	0,0001-1 %
CuBe in verarbeiteter Form	0,25-2,0 %
CuBe	2-10 %
AlBe	1-5 %
NiBe	6-14 %
Metallisches Beryllium	> 50 %

Quelle: BeST (2012), BeST (2015), Heraeus (1999)

Berylliumoxid wird in Europa in Mengen von 2-3 t pro Jahr verwendet (Gensch 2014). Knudson (2008) geht davon aus, dass in der ersten Hälfte der 2000er-Jahre etwa 1,5 t Berylliumoxid pro Jahr in keramischen Anwendungen im elektronischen Bereich in Europa eingesetzt werden.

Berylliumlegierungen werden im Bereich der elektrischen und elektronischen Geräte in Schaltfedern und Steckverbindern in Weißer Ware sowie Industrieelektronik, Telekommunikationsinfrastruktur von Telekommunikationsgeräten und Medizingeräten sowie

[5] Pur, als Legierung und als Bestandteil in keramischen Verbindungen.

in Membranen in Lautsprechern verwendet. Bei Mobiltelefonen sind mögliche Anwendungskomponenten beispielsweise Batterie-, Lautsprecher-, Antennen- und SIM-Kartenkontakte. In PC können es die Batterie- oder Sockelkontakte sein oder Lager von optischen Laufwerken (Materion 2014) (NGK 2014). Knudson (2008) gibt an, dass der Gehalt von Beryllium in einem Handy bei 40 ppm liegt.

Beryllium-Keramiken (Berylliumoxid) finden Anwendung in Fahrzeugzündsystemen, Transmittern für Radiofrequenz, Hochleistungsmikrowellentransmittern, Mobilfunk-Basisstationen, Radarsystemen, Zielsystemen von militärischen Verteidigungsanlagen (Materion 2013, Knudson 2008) sowie in Wärmeleitpasten von Prozessoren und Transistoren in Elektronikgeräten (Eneh 2011). In Lasern für Augenoperationen werden spezielle Beryllium-Keramiken eingesetzt, die besonders präzise Operationstechniken ermöglichen. Beryllium-Keramiken werden ebenfalls bei HIV- und Blindheitstests und in Geräten zur Nierensteinentfernung, Laserhautstraffung, nicht-invasiver Chirurgie und in Defibrillatoren verwendet. (DG Entr 2010).

2.9.1.2 Toxizität von Beryllium(verbindungen)

Beryllium (CAS Nummer 7440-41-7 EC Nummer 231-150-7) ist unter REACH registriert. Die CLP-Einstufungen lauten:

- Akut toxisch 3 H301,
- Akut toxisch 3 H330,
- Hautirritierend H315,
- Irritierend für das Auge 2 H319,
- Hautsensibilisierend 1 H317.

Quelle: ECHA (2015)

Berylliumoxid (CAS Nummer: 1304-56-9, EC Nummer: 215-133-1 Index Nummer: 004-003-00-8) ist ebenfalls unter REACH registriert. Die CLP-Einstufung führt auf:

- Karzinogen 1B H350i,
- Akut toxisch 2 H330,
- Akut toxisch 3 H301,
- STOT[6] RE 1 H372,
- Irritierend für das Auge 2 H319,
- STOT SE 3 H335,
- Hautirritierend 2 H315,
- Hautirritierend 1H317.

Quelle: ECHA (2015)

Die Auswertung zeigt, dass aufgrund der Toxizität der Separation von Beryllium(verbindungen) aus EAG eine wichtige Rolle zukommt[7].

2.9.1.3 Entsorgung

Die Erfassung Beryllium-haltiger Elektroaltgeräte aus privaten und kleingewerblichen Quellen (im Sinne des ElektroG) erfolgt in verschiedenen Sammelgruppen, je nach Geräteart (z. B. SG 1 für Haushaltsgroßgeräte, SG 3 für IT&UE). Die Erfassungsrate wird erwartungsgemäß in der gleichen Größenordnung liegen wie die der jeweiligen Gerätekategorien in den Sammelgruppen.

Beryllium, das in NE-Metallkomponenten als Legierung enthalten ist, wird vermutlich in der mechanischen Behandlung näherungsweise mit derselben Effizienz in die NE-Fraktionen (z. B. Kupferfraktion) separiert, wie die nicht-Beryllium-haltigen NE-Metall-Komponenten. Zu der Frage, ob Kleinteile wie z. B. kleine Kontakte überproportional häufig in bestimmte nicht-Zielfraktionen ausgetragen werden (z. B. Kunststofffraktion), sind keine Untersuchungen bekannt.

Eine Behandlung in der Form, dass Beryllium-Legierungen für die Rückgewinnung separiert werden, ist unwahrscheinlich (Cu mit Be-Legierungsanteilen sind nicht erkennbar, i.d.R. klein und schwierig separierbar).

[6] Single Target Organ Toxicity

[7] Hinsichtlich der Kritikalität von Beryllium siehe Kapitel 2.4 und 2.7.

Keramische Beryllium-Komponenten werden in der mechanischen Behandlung mit hoher Wahrscheinlichkeit zerstört und treten als Staub aus, wodurch eine Arbeitschutzproblematik entstehen kann. Sind die Beryllium-Keramiken von Metall umschlossen, ist der Aufschluss von der Stabilität der Umschließung und dem Behandlungsprozess abhängig (Elektrocycling 2014).

Eine Separation keramischer Beryllium-Komponenten ist derzeit technisch gesehen nur manuell möglich.

Reine Beryllium-Komponenten, die nicht mit Eisen, Aluminium, Cadmium oder Blei u. ä. verunreinigt sind, können direkt wieder zur Produktion von Beryllium-Komponenten eingesetzt werden (Materion 2011).

Legierungen, die Beryllium enthalten, machen etwa 0,15 % aller Kupferlegierungen in elektrischen und elektronischen Geräten aus. Sie werden wie nicht Beryllium-haltiges Kupfer wieder eingeschmolzen. Das Beryllium wird im Prozess überwiegend in die Schlacke überführt (BeST 2015). Verfahren zur Rückgewinnung von Beryllium aus Keramiken aus dem post consumer-Bereich sind nicht bekannt.

2.9.2 Antimon

2.9.2.1 Anwendung

Antimon wurde im Jahr 2013 %weltweit zu ca. 52 % als Flammschutzmittel verwendet. 26 % wurden in Bleibatterien genutzt, 12 % als Legierungselement für Blei. (BGR 2013). Der globale Verbrauch von Antimon lag im Jahr 2011 bei 206.000 t, der Verbrauch von Antimontrioxid bei weiteren 124.950 t (BGR 2013).

Antimon wird in Form von Antimontrioxid (Sb_2O_3) als Synergist zu Flammschutzmitteln u. a. in Elektro- und Elektronikgeräten (EEG) eingesetzt. Es wirkt in Kombination mit halogenhaltigen Flammschutzmitteln. Sb_2O_3 wird z. B. in ABS, PA und PC angewendet.

Angaben zu Antimonkonzentrationen in verschiedenen EEG-Arten sind in Tabelle 11 und in LED in Tabelle 12 enthalten.

Tabelle 11: Anteil von Antimon in verschiedenen Arten von Elektronikgerätekategorien in Gew.-%

Braune Ware		IT und Büroausstattung		Weiße Ware	
Kunststoffe	gesamt	Kunststoffe	gesamt	Kunststoffe	gesamt
1,3	0,3	1,9	0,19	0,4	0,03

Quelle: Boerrigter (2000)

Tabelle 12: Konzentrationen von Antimon in LED (Anteil von Antimon in verschiedenen Arten von Elektronikgerätekategorien, (in mg/kg)

Rote LED	Gelbe LED	Grüne LED	Blaue LED	Weiße LED
2-15,4	1,9-2,8	2,5-36	1,3-1,5	25,9

Quelle: Lim et al. (2012)

2.9.2.2 Toxizität

Antimontrioxid (CAS Nummer 1309-64-4, EC Nummer 215-175-0) ist nach Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (CLP) als gesundheitsgefährdend und als H351 (kann vermutlich Krebs erzeugen) eingestuft.

Neben der Kritikalität von Antimon (siehe EU Kom 2014) muss daher auch aufgrund des Kriteriums der Toxizität ein besonderer Augenmerk auf den Verbleib des Antimons bei der Behandlung von EAG gelegt werden.

2.9.2.3 Entsorgung

Antimon, das als Flammschutzmittel in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzt wurde, wird derzeit nur in geringem Maße zurückgewonnen. Als wesentlicher Grund hierfür werden die geringe Konzentration und die Einbindung in die Materialmatrix gesehen (z. B. CHEMIE 2015).

Für eine Kreislaufführung können verschiedene Strategien verfolgt werden. Zur gezielten Separation von Antimon-reichen Materialströmen oder Fraktionen ist zunächst eine Identifizierung erforderlich. Eine automatische Identifizierung von Sb_2O_3-haltigen Kunststoffen ist derzeit großtechnisch nicht implementiert (Stand Juni 2015). Eine optische Identifizierung besonderer Fraktionen, die potenziell Antimontrioxid enthalten, wie z. B. hochwertiger Leiterplatten erfolgt jedoch üblicherweise auch heute schon bei Erstbehandlern aufgrund des Wertgehaltes von Leiterplatten.

Mit dem Fokus auf Leiterplatten untersuchen derzeit MPM Environment Intelligence KG und der Lehrstuhl für Rohstoffaufbereitung und Recycling der Technischen Universität Clausthal im Rahmen des AVAntiE-Projektes Möglichkeiten zur Gewinnung marktfähiger Antimonkonzentrate aus Kunststoffen aus Elektroaltgeräten (Himmel 2015).

Im Projekt „Add Resources“ werden derzeit durch Anwendung des vom Fraunhofer IVV entwickelten CreaSolv®-Prozesses Möglichkeiten gesucht, wie über eine Löseverfahren für flammgeschützte Kunststoffe Antimon separiert werden kann (CHEMIE 2015)

Ein weiteres Löseverfahren wurde in einem Projekt entwickelt, dessen Ziel die Rückgewinnung technischer Kunststoffe aus EAG und die Herstellung eines hochwertigen, marktgängigen Kunststoffcompounds war. Dabei stellte die Separation von Flammhemmern eine Voraussetzung der Verwertung der Kunststoffe dar. Die Kreislaufführung der Flammhemmer war zwar nicht explizites Ziel des Projektes. Entsprechende Grundlagen wurden jedoch auf der Ebene der Separation mit erarbeitet (Woidasky et al. 2010).

In integrierten Kupferhütten kann Antimon als Antimonsalz für die industrielle Anwendung zurückgewonnen werden. Die Rückgewinnungseffizienz wird auf 70 % geschätzt[8] (Brusselaers 2006, Hagelüken 2015, Meskers 2015, Nolte 2015). Dieser Pfad steht für Leiterplattenkunststoffe zur Verfügung, nicht jedoch für Gehäusekunststoffe, da sie keine Zielmetalle der integrierten Kupferhütte enthalten.

2.9.2.4 Schlussfolgerungen

Derzeit bestehen großtechnisch etablierte Möglichkeiten lediglich zur Gewinnung von Antimon (in Form von Salzen) aus Leiterplattenkunststoffen. Aus ressourcenpolitischer Sicht ist die Zuführung von Leiterplatten zu Verfahren mit Antimon-Rückgewinnung wie der integrierten Kupferhütte in jedem Fall wg. der Rückgewinnung von Edelmetallen sinnvoll. Eine Rückgewinnung des Antimons aus Antimontrioxid erscheint auch unter toxikologischen Aspekten sinnvoll, da hierbei eine Verschleppung in Rohstoffkreisläufen vermieden wird.

Behandlungs- bzw. Rückgewinnungsmöglichkeiten für Antimontrioxid aus anderen Fraktionen sind in einem Entwicklungsstadium, bei dem noch kein Zeithorizont beschrieben werden kann, zu dem die Verfahren sicher großtechnisch verfügbar wären.

Eine Festlegung quantifizierter Rückgewinnungsziele für Antimontrioxid ist neben den fehlenden Rückgewinnungsverfahren aus Kunststoffen auch aufgrund der unsicheren Datenlage kaum möglich.

[8] „Reliable and meaningful mass balances could not be measured due to the relatively short term and the industrial scale of this trial as well as the integration of the integrated smelter into the whole plant operations at the Hoboken site.“ Brusselaers (2006)

3 Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen

3.1 Zielstellung

Gegenstand dieses Arbeitsschrittes war die Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen in 30 ausgewählten Elektro- und Elektronikgeräten.

Die Quantifizierung der in Elektro- und Elektronikgeräten enthaltenen Metallmengen stellte eine besondere Herausforderung dar, da der Elektroniksektor kurze Innovationszyklen aufweist, bei denen innerhalb kurzer Zeiträume neue Produktvarianten oder sogar gänzliche neue Produkte auf den Markt kommen. Hinzu kommt, dass auch Hersteller aufgrund von hochkomplexen Zuliefererketten oftmals keine vollständigen Informationen über die stoffliche Zusammensetzung ihrer Produkte haben (vgl. Lauridsen/ Jorgensen 2010). In der Regel verpflichten die Hersteller ihre Zulieferer auf definierte Funktionalitäten sowie die Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten (z. B. RoHS). Kenntnisse über die exakten Metallgehalte einzelner Komponenten und deren Bezugsquellen werden dabei nur in Ausnahmefällen weitergegeben (z. B. bei besonderem öffentlichem Interesse wie bei Coltan aus Kriegsgebieten). Durch die modulare Bauweise ändern sich die Inhaltsstoffe der Komponenten ebenfalls sehr schnell. Je nach Preisniveau und Marktsituation werden Stoffe gegeneinander ausgetauscht oder in unterschiedlichen Zusammensetzungen verwendet, z. B. wird Palladium in Keramikvielschichtkondensatoren (engl. Multi Layer Ceramic Capacitor, MLCCs) zunehmend häufiger durch Nickel ersetzt (vgl. Johnson Matthey 2012).

Der Arbeitsschritt zur Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen in ausgewählten Elektrogeräten zielt vor diesem Hintergrund darauf ab, eine entsprechende Datengrundlage für die weiteren Arbeitspakete im Rahmen des Projekts zu liefern. Die notwendige Balance zwischen Breite und Tiefe der Analyse sowie zwischen zu erwartender Genauigkeit und zu akzeptierenden Schwankungen und Spannweiten wird u. a. durch eine Begrenzung auf 30 Elektro- und Elektronikprodukte erreicht.

3.2 Methodik

Die methodische Herangehensweise zielt auf die Entwicklung einer Matrix von Informationen zu Metallen, Komponenten und Produkten ab. Die Datenbasis bildeten umfangreiche Literaturrecherchen und Expertenbefragungen.

Dabei wurde zunächst die Verwendung der RePro-Metalle in Elektro(nik)geräten auf der Komponentenebene lokalisiert und dies anhand einer Metall-Komponenten-Matrix zusammengefasst. Anschließend erfolgte eine Zuordnung von Komponenten zu Produkten und die Darstellung in einer Komponenten-Produkt-Matrix.

Anhand der Matrix erfolgte eine Auswahl von 30 Elektronikgeräten, die für die Zielstellung dieses Projektes besonders relevant waren (= RePro-Geräte, vgl. S. 102). Um Wissenslücken bezüglich der Metallgehalte bei der produktbezogenen Quantifizierung teilweise zu schließen wurden chemische Analysen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Quantifizierung wurden für eine Clusterung verwendet, die sich an der Methode von Oguchi et al. (2011) orientiert, um die Metallgehalte sowohl über ihre Konzentrationen in einzelnen Produkten als auch über das Gesamtaufkommen in einem Land abzubilden. Angesichts der beschriebenen Dynamiken im Elektroniksektor wurde ebenfalls eine qualitative Abschätzung von Entwicklungen vorgenommen, die sich zukünftig auf die im Wesentlichen für das Bezugsjahr 2010[9] ermittelten Ergebnisse auswirken könnten.

3.3 Entwicklung der Metall-Komponenten-Matrix

3.3.1 Metallauswahl

Ausgangspunkt für die Metall-Komponenten-Matrix war die Liste der RePro-Metalle (siehe Kapitel 2). Aufgrund der Besonderheiten ihrer Verwendung wurden Antimon und Beryllium gesondert behandelt (siehe Abschnitt 2.8). Stellvertretend für die Gruppen der leichten und schweren Seltenen Erden wurden Yttrium und Neodym ausgewählt, deren Verwendungen lokalisiert und quantifiziert wurden. Mit den Anwendungsbereichen Magnete und Leuchtstoffe deckt diese Auswahl wichtige Anwendungsgebiete für Seltene Erden in Elektro- und Elektronikgeräten sehr gut ab.

[9] Die Arbeiten zur Lokalisierung und Quantifizierung von RePro-Metallen wurden in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführt.

Die Angaben zu Neodym und Yttrium erlauben ferner eine grobe Abschätzung der anderen Metalle der Seltenen Erden, da sie häufig in typischen Mengenverhältnissen eingesetzt werden. Für den Einsatz in Neodym-Eisen-Bor-Magneten wird die durchschnittliche Zusammensetzung mit 61 % Eisen, 29 % Neodym, 3 % Dysprosium und 1 % Bor angegeben (bezogen auf das Gewicht, vgl. Oakdene Hollins 2010) (siehe Tabelle 34). Allerdings ist die Zusammensetzung auch abhängig von den jeweiligen Einsatzgebieten: Bei besonders hohen Betriebstemperaturen werden teilweise bis zu 10 % Dysprosium verwendet, bei extremen äußeren Einflüssen wird das Neodym teilweise bis zu 25 % durch Praseodym ersetzt. Bei besonderen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit wird das Dysprosium teilweise durch (das deutliche teurere) Terbium ersetzt (vgl. Oakdene Hollins 2010).

Für Yttrium wird die Abschätzung durch die unterschiedlichen Einsatzgebiete erschwert (Bildschirme, Lampen). Eine grobe Abschätzung ist jedoch auf Basis von Angaben der USGS zur Zusammensetzung von Leuchtstoffen möglich: Danach beträgt der durchschnittliche Anteil von Yttriumoxid 69 %, von Ceroxid 11 %, Lanthanoxid 8,5 %, Europium 4,9 %, Terbiumoxid 4,6 % und Gadoliniumoxid 1,8 % (vgl. USGS 2011) (siehe Tabelle 35)).

3.3.2 Metall-Komponenten-Matrix

Zunächst erfolgt eine qualitative Beschreibung der unterschiedlichen Anwendungsbereiche dieser Metalle in Elektronikprodukten mit dem Ziel, spezifische Komponenten zu identifizieren, in denen die Metalle konzentriert auftreten. Die Ergebnisse werden in einer ersten Matrix, der Metall-Komponenten-Matrix, dargestellt (siehe Tabelle 14).

Grundlage der Matrix sind dabei neben direkt zitierten Quellen zu einzelnen Metallen im Wesentlichen folgende Überblicksstudien: MaRess (2011), IZT/Adelphi (2011), EU (2010), Buchert et al. (2009), Oakdene Hollins (2011), Huisman et al. (2007), Chancerel (2010), Buchert et al. (2012).

Anhang 10.1 zeigt eine Übersicht der dort jeweils aufgeführten Komponenten. Da die Studien unterschiedliche Vorgehensweisen und Schwerpunkte gewählt haben, ist der Aggregationsgrad der genannten Komponenten teilweise unterschiedlich hoch. Die Ergebnisse zeigen aber ein weitgehend übereinstimmendes Bild für die unterschiedlichen Metalle.

3.3.2.1 Gold

Gold wird hauptsächlich auf Leiterplatten eingesetzt. Zudem wird es als Kontaktwerkstoff verwendet oder als Bestandteil von Bildschirmbeschichtungen aufgesputtert. Tabelle 13 gibt einen Überblick über die möglichen Anwendungsbereiche.

Tabelle 13: Anwendungsbereiche von Gold in Elektrobauteilen

Loses Gut	Bimetall	Galvanische Beschichtung	Sputterbeschichtung	Lack, Paste	Lötverbindung
Bonddraht für integrierte Schaltkreise, Transistoren, Dioden	Steckkontakte	Leiterplatten, Steckkontakte, Löt- und Verbindungsflächen, Schalter, Korrosionsschutz von Halbleitergehäusen	Dünnschicht-Hybridschaltungen, Leiterkontakte, Verbindungsflächen	Dickschicht-Hybridschaltungen, Lötflächen für Kontakte, Chip-Anschluss, integrierte Schaltkreise	Spezielle Lote für Chip-Anschlüsse, Lötverbindungen für Bauteile, Verbindungen in Leistungs-Halbleiterbauelementen

Quelle: Chancerel, P. 2010

3.3.2.2 Silber

Silber hat viele Anwendungsbereiche in Elektrogeräten. Es wird in Leiterplatten eingesetzt (u. a. MLCCs), in bestimmten Batterien, als Bestandteil von Bildschirmbeschichtungen, als Kontaktwerkstoff sowie als Beschichtung von Festplatten (vgl. USGS 2012, Chancerel 2010).

Nach Angaben von Angerer et al. (2009a) wurden im Jahr 2006 25 % der global produzierten Silbermenge für die Produktion von Weichloten verwendet.

3.3.2.3 Palladium

Die wichtigste Anwendung von Palladium ist in Vielschichtkondensatoren (MLCC), die in großer Stückzahl als Entkopplungselemente in Halbleiterbauelementen eingesetzt werden. MLCCs sind praktisch auf sämtlichen Leiterplatten in unterschiedlicher Anzahl zu finden: Je komplexer das elektronische Gerät, desto höher die Zahl der benötigten MLCCs. Sie dienen der Speicherung elektrischer Ladung und werden zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in integrierten Schaltkreisen verwendet.

Die Innenelektroden von MLCCs werden überwiegend aus Palladium-Silber-Legierungen hergestellt. Die typische Zusammensetzung von AgPd-Elektroden in MLCC-Kondensatoren liegt bei 70:30 bzw. 95:5 (Stephenson et al. 2004). MLCC-Kondensatoren wiegen je nach Anwendung und Bauweise zwischen 0,00017 g und 0,45 g (ZVEI 2003). Der Miniaturisierungsprozess der letzten Jahre hat zu einem Rückgang der Palladiummassen pro Gerät geführt. Demgegenüber stand jedoch eine gestiegene Anzahl von MLCCs pro Gerät (vgl. Johnson Matthey 2012). Auf bedruckten Leiterplatinen (PWB) eingesetzt, macht Palladium etwa 0,15 % des Gesamtgewichts aus (vgl. Scharnhorst et al. 2005, 552).

Teilweise wird Palladium als hochwertiges Kontaktmaterial eingesetzt, hier ersetzt es Gold, da es aufgrund seiner geringeren Dichte in noch dünneren Schichten aufgetragen werden kann. Auch in vereinzelten hochwertigen Bauteilen wie Hybrid-IC, die ebenso auf Leiterplatten verwendet werden, wird Palladium eingesetzt (vgl. Johnson Matthey 2012).

3.3.2.4 Kobalt

Haupteinsatzgebiet sind wiederaufladbare Batterien, die sowohl separat als auch als Bestandteil von Elektronikgeräten in Verkehr gebracht werden. Kobalt wird vor allem in Lithium-Ionen Batterien, aber auch in Nickel-Metall-Hybrid (NiMH) Batterien und in Nickel-Cadmium Batterien eingesetzt. Daneben wird Kobalt auch in integrierten Schaltkreisen auf Leiterplatten verwendet, die bis zu 15 % Kobalt enthalten. Als Samarium-Kobalt wurde es auch über lange Zeiträume in Magneten auf Festplatten genutzt. Es wird mittlerweile jedoch weitgehend durch Neodym ersetzt.

3.3.2.5 Gallium

Gallium wird in Elektronikgeräten zum allergrößten Teil entweder als Galliumarsenid (GaAs) oder als Galliumnitrid (GaN) verwendet. Haupteinsatzgebiete sind hochwertige integrierte Schaltkreise, (ca. 2/3 des Gesamtverbrauchs in den USA vgl. USGS 2012). In Smartphones sind ca. 7,5 mg Gallium pro Gerät enthalten (vgl. Spectaris 2011). Weitere relevante Komponenten sind LEDs, welche vor allem als Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen eingesetzt werden. Auch in Laserdioden im Bereich der Glasfaserkommunikation wird Gallium verwendet. Zusammen mit LEDs machen diese Anwendungen knapp ein Drittel der Nachfrage aus. Ein weiterer Anwendungsbereich sind Fotodetektoren, die u. a. in Miniaturkameras eingesetzt werden, bisher entspricht dieser Bereich jedoch nur ca. 2 % der Gesamtnachfrage, vgl. USGS (2012).

3.3.2.6 Indium

Der Einsatz von Indium ist auf wenige Komponenten beschränkt (vgl. Rotter et al. 2012). Hauptsächlich wird Indium als Indium-Zinn-Oxid in Flachbildschirmen eingesetzt; hauptsächlich in LCD-Bildschirmen und in Touchscreens. Auch wenn die LCD-Panels je nach Anwendung einen unterschiedlichen Anteil am Gesamtgewicht des Produkts aufweisen, ist der Aufbau der Komponenten relativ einheitlich: Grundlage bildet auf beiden Seiten eine Schicht TFT-Glas, auf der Farbpigmente und abschließend die nur einige Hundert Nanometer dicke ITO-Schicht aufgetragen wird. Auf den Außenseiten werden Polarisationsfolien aufgeklebt (vgl. Rotter et al. 2012), zwischen den beiden beschichteten Glasplatten befinden sich die Flüssigkristalle. In Form von InGaN-Verbindungen wird Indium in bisher geringen Mengen, aber mit zunehmender Bedeutung auch in spe-

ziellen LEDs eingesetzt. Zudem findet Indium Verwendung in Dünnschicht-Photovoltaikmodulen. Photovoltaikmodule sind jedoch nicht der Fokus dieses Projektes sondern werden u. a. in Sander (2016) betrachtet.

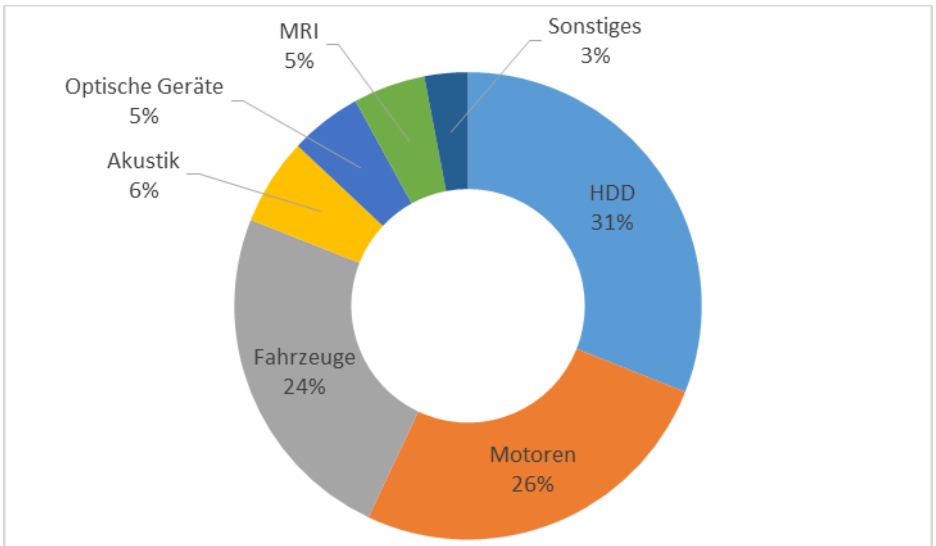
3.3.2.7 Zinn

Zinn wird hauptsächlich als Bestandteil von Weichloten eingesetzt. Nach Angerer et al. (2009) machen die in Elektronikprodukten eingesetzten Weichlote etwa die Hälfte der gesamten globalen Zinnnutzung aus. Ein weiterer Anwendungsbereich von Zinn ist die Beschichtung in Flachbildschirmen mit Indium-Zinn-Oxid (ITO): „Der Effekt dieser Anwendung auf die Nachfrage von Zinn ist allerdings mengenmäßig bedeutungslos“ (Angerer et al. 2009).

3.3.2.8 Neodym

Moderne Motoren mit kleinen Abmessungen und gleichzeitig hoher Leistung sind oft mit Neodym-Bor-Magneten ausgestattet. Ca. 31 % der verwendeten Neodymmasse wird in Festplatten genutzt (siehe Abbildung 13). Nd-Magneten werden zum Zweck der Temperaturbeständigkeit auch Praseodym und Dysprosium beigemischt (vgl. Siemens 2012).

Abbildung 13: Neodym in Magneten - Anwendungsbereiche der Magnete



Datengrundlage: Shin Etsu (2009), eigene Darstellung

Rotter et.al. (2012) beschreiben auf der Basis von Demontageuntersuchungen bei 20 Festplatten, dass sich der überwiegende Teil des Neodyms in den beiden Motoren befindet, die zum Antrieb der Spindel und zum Bewegen des Schreib-Lese-Kopfs verwendet werden. In Magneten findet Neodym zudem Anwendung in miniaturisierten Lautsprechern, vor allem in In-Ohr-Kopfhörern, in Handys und Mikrofonen. Ein weiterer Anwendungsbereich für Neodym (und Lanthan) sind NiMH-Batterien.

3.3.2.9 Yttrium

Yttrium findet als Trägermaterial für andere Seltene Erden in Leuchtstoffen Anwendung. Als Komponenten im Elektronikbereich sind damit vor allem Bildschirme (sowohl CRT als auch LCD-Geräte), LED-Lampen und Gasentladungslampen relevant.

3.3.2.10 Tantal

Tantal zeichnet sich durch eine gut steuerbare Oxidation aus, wodurch sehr dünne, amorphe und gut isolierende Oxidschichten gebildet werden können, was vielfältige Anwendungen in der Optik, Optoelektronik und Elektronik eröffnet. Besonders $(Ta_xSi_{1-x})N$-Verbindungen ermöglichen ultradünne Schichten zwischen Si-Halbleitern und Kupferleiterbahnen und dadurch die Miniaturisierung von Speicherchips. Haupteinsatzgebiet in der Elektronik sind daher hochwertige Kondensatoren, die in komplexen und miniaturisierten Elektronikprodukten auf Leiterplatten eingesetzt werden. Gille und Meier (2012) geben an, dass mittlerweile ca. 10 % der gesamten Tantalproduktion für diese Anwendungen eingesetzt wird. Bisher wird Tantal nur in 2-5 % aller Kondensatoren verwendet, bis 2011 hat die Zahl jedoch deutlich zugenommen. Als Tantaloxid werden geringe Mengen auch in opto-elektronischen Komponenten eingesetzt.

Sowohl USGS (2012) als auch Angerer et al. (2009) geben jedoch an, dass für den gesamten Elektronikbereich (Kondensatoren, IR-Sensoren und Elektrokeramik) bereits heute

60 % bzw. 50 % der gesamten Tantalproduktion verwendet werden. Die Spannbreite dieser Angaben verdeutlicht die extreme Dynamik, die vor allem beim Tantaleinsatz in Kondensatoren zu beobachten ist.

3.3.2.11 Auswahl der Komponenten

Die dargestellten Anwendungsgebiete der Metalle sind im Anhang 10.1 differenziert dargestellt. Die wesentlichen Anwendungsgebiete im Projektkontext können in sieben Komponenten zusammengefasst werden:

- Bestückte Leiterplatten,
- Lote, Kontaktflächen (teilweise auch auf Leiterplatten, auch in anderen Teilen),
- LED,
- Magnete,
- Batterien,
- Bildschirmbeschichtungen/Leuchtstoffe,
- Laser/Optoelektronik.

Die folgende Matrix (Tabelle 14) stellt die Zuordnung der RePro-Metalle zu den Komponenten dar. Die unterschiedliche Bedeutung innerhalb des Elektronikbereichs wurde durch eine dreistufige Klassifizierung verdeutlicht: (+++) bezeichnet Komponenten, die mehr als 50 % der Anwendung des RePro-Metalls im Elektroniksektor ausmachen, (++) zwischen 10 % und 50 % und (+) Komponenten mit weniger als 10 % der Nachfrage des RePro-Metalls im Elektroniksektor ausmachen. Insgesamt zeigt sich, dass sich die Hauptanwendungen der meisten Metalle auf wenige Komponenten konzentrieren.

Tabelle 14: Metall-Komponenten-Matrix

Komponenten	Gold	Silber	Palladium	Kobalt	Gallium	Indium	Zinn	Neodym	Yttrium	Tantal
Bestückte Leiterplatten	++	++	+++	+	+++					+++
Lote, Kontaktflächen	++	++	++				+++			
Batterien		+		+++				++		
Bildschirmbeschichtungen/Leuchtstoffe	+	+				+++	+		+++	
LED					++	+				
Magnete								+++		
Laser/Optoelektronik					+					+

3.4 Entwicklung der Komponenten-Produkt-Matrix

Auf der Basis der Metall-Komponenten-Matrix wurde die Komponenten-Produkt-Matrix in Tabelle 15 entwickelt. Sie führt zu einer Auswahl von 30 RePro-Produkten[10], für die anschließend die Metallmengen quantifiziert werden. Folgende Kriterien waren für die Produktauswahl ausschlaggebend:

- Geräte der Sammelgruppen[11], 3, 4 und 5 des ElektroG,
- Fokus auf dem zukünftigen Altgeräteaufkommen, so dass auch neuartige Anwendungen berücksichtigt wurden, die derzeit nicht als Elektroaltgerät vorliegen (z. B. Tablet Computer),
- Stellvertreterprodukte: da einige Komponenten, wie z. B. Akkumulatoren, in diversen Produkten eingesetzt werden, sind einzelne stellvertretende Produkte ausgewählt worden,

[10] RePro-Metalle werden auch in anderen Elektrogeräten eingesetzt. Diese sind in dem UBA-Projekt ReStra (Sander et al. 2016) abgedeckt.

[11] Sammelgruppe 3: Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik; Sammelgruppe 4: Gasentladungslampen; Sammelgruppe 5: Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente.

- Absolute Menge: neben der Menge der eingesetzten Metalle pro Produkt sind auch Abschätzungen der absolut auf den Markt gebrachten Metallmengen in die Auswahl eingeflossen,
- Abgrenzung zu weiteren Forschungsprojekten: Produkte, die zwar teilweise erhebliche Mengen der RePro-Metalle enthalten (z. B. Gasentladungslampen, Photovoltaikmodule) werden nicht behandelt, da die jeweiligen Produkte und ihre Mengenströme bereits in anderen Projekten behandelt wurden (Sander et al. 2015, Sander et al 2016).

Im Folgenden wird ausgehend von den verschiedenen Komponenten die Auswahl der Produkte für die weiteren Analysen begründet.

3.4.1 Produktauswahl mit Fokus auf bestückte Leiterplatten und Lote

Ausgangspunkt der Produktliste waren die Analysen von Chancerel (2010), die mit Fokus auf Gold, Silber, Palladium die 30 wichtigsten Elektronikgeräte identifiziert haben. Durch den von Chancerel gewählten Fokus auf bestückte Leiterplatten kann angesichts der Analysen zur Lokalisierung der Metalle in Komponenten erwartet werden, dass diese Produktauswahl auch für Zinn (Lote) und Tantal (Kondensatoren) eine gute Ausgangsbasis bilden.

Leiterplatten werden in fast allen elektronischen Geräten eingesetzt. Allerdings unterscheidet sich der Gehalt an wertvollen Metallen stark. Recyclingunternehmen unterscheiden daher mindestens drei Klassen von Leiterplatten, die deutliche Unterschiede im Ankaufpreis aufweisen. Als Produkte mit Leiterplatten mit hohem Metallgehalt gelten vor allem Computer, Telekommunikationsgeräte sowie hochwertige Messgeräte. Im Rahmen des Vorhabens werden wegen ihrer massenhaften Anwendung auch USB-Speichergeräte sowie stellvertretend für den Bereich der Haushaltskleingeräte Kaffeemaschinen[12] berücksichtigt.

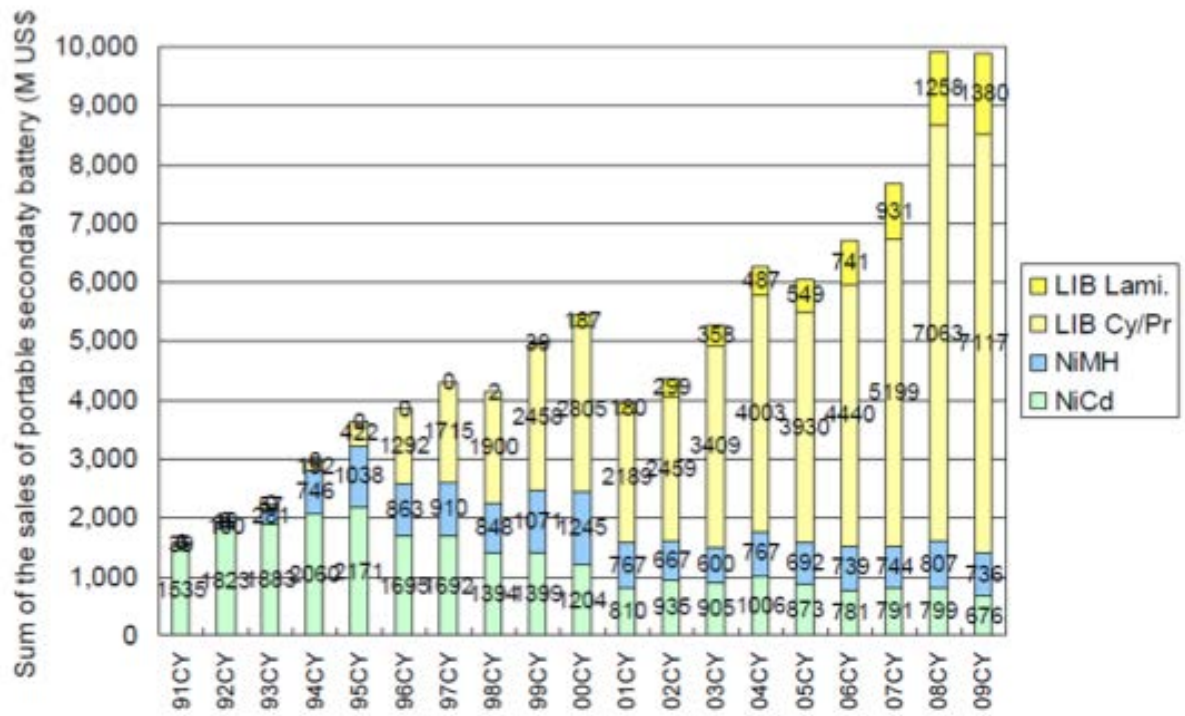
3.4.2 Produktauswahl mit Fokus auf Batterien

Für die Produktauswahl mit Bezug auf wiederaufladbare Batterien als Anwendung für Kobalt wurde auf eine bestehende Marktuntersuchung (RECHARGE 2010) zurückgegriffen.

Für die Lithium-Ionen-Batterien wurden die Laptops, Handys, tragbare MP3 Player und Videospiele sowie Video- und Fotoaufnahmegeräte ausgewählt. Für den Bereich der NiMH-Batterien wurden schnurlose Heimtelefone, Rasierapparate, Bohrmaschinen und Wecker zurückgegriffen. Für diesen Akkumulatortyp zeigt sich ein extrem breites Anwendungsspektrum, sodass diese Produkte stellvertretend für die verschiedenen Anwendungsbereiche (Telekommunikation, Hygieneartikel, Werkzeuge und sonstige Haushaltskleingeräte) stehen (vgl. Mudgal 2011). Die folgende Abbildung verdeutlicht, dass die kobalthaltigen Batterietypen Li-Ion (hier als LIB gekennzeichnet) und NiMH in den letzten Jahren verstärkt eingesetzt wurden.

[12] Dabei zeigt die ausgewertete Literatur, dass Leiterplatten aus Haushaltskleingeräten wie z. B. der Kaffeemaschine geringere Gehalte an RePro-Metallen enthalten, als z. B. Computer.

Abbildung 14: Globale Marktentwicklung für wieder aufladbare Gerätebatterien in Mio. US $, 1991-2009



Quelle: ESWI (2010)

3.4.3 Produktauswahl mit Fokus auf Bildschirmbeschichtungen/Leuchtstoffe und LED

Für die Auswahl von Produkten mit Flachbildschirmen/LCD-Displays wurde auf Marktdaten von Displaysearch (2012) zurückgegriffen. Hauptanwendungen sind demnach Fernsehgeräte und Computerbildschirme. Im Rahmen dieses Projekts wurden LCD-Fernseher und -Monitore mit unterschiedlichen Hintergrundbeleuchtungssystemen betrachtet, die sich in Hinblick auf den Einsatz Seltener Erden bzw. Gallium (Kompaktleuchtstofflampen bzw. LEDs) unterscheiden. Außerdem wurden CRT-Monitore und -Fernsehgeräte aufgenommen, die zwar nur noch in geringen Stückzahlen auf den Markt gebracht werden, die aber noch in relevanten Mengen als Altgeräte anfallen. Weitere wichtige Produkte mit Displays sind Laptops, Tablet-Computer, Handys und Smartphones. Neben diesen Anwendungen verfügen zunehmend auch weitere Geräte wie Multifunktionsdrucker, Navigationsgeräte, Digitalkameras, Camcorder und tragbare Videospiele über kleinformatige LCD-Bildschirme.

Mit Blick auf die in Dreibandleuchtstoffen enthaltenen Seltenen Erden sind Leuchtstoffröhren, LED Lampen und Kompaktleuchtstofflampen relevante Anwendungsgebiete.

3.4.4 Produktauswahl mit Blick auf Magnete

Hochwertige Magnete, in denen Seltene Erden zum Einsatz kommen, finden im Projektkontext vor allem bei Festplatten und in Lautsprechern Anwendung. Du und Graedel (2011) stellten fest, dass NdFeB-Magnete zu 35 % in Computern, zu 25 % in Audiosystemen, zu 15 % für Windturbinen, zu 15 % in Automobilen, zu 5 % in medizinischen Anwendungen und nur zu 5 % in weiteren Produkten im Haushalt Anwendungen finden. Nach Aussagen von AKG (vgl. Li 2012), einem Hersteller von Lautsprechern, werden in den Produkten bereits seit den 1980er Jahren Neodym-Magneten verwendet und heute nahezu ausschließlich. Nach Auskunft von JBL Professional (vgl. Li 2012) befinden sich Neodymmagneten vor allem in Hochtönern.

Als Produkte wurden in diesem Projekt daher PCs, Laptops, DVD-Spieler und externe Festplatten sowie Kopfhörer und Lautsprecher für den Bereich Akustik ausgewählt.

3.4.5 Produktauswahl mit Blick auf optoelektronische Komponenten

Mit dem Trend zu Multifunktionsgeräten, z. B. der Integration von Webcams in Laptops oder Multifunktionslaserdrucker mit Scanfunktion, nimmt die Anwendung optoelektronischer Komponenten in Produkten im Projektkontext zu, in denen Gallium und Tantal Verwendung finden. Optoelektonische Komponenten sind auch in Smartphones und Handys, Foto- und Videokameras sowie in Beamern.

3.4.6 Gesamtübersicht Komponenten-Produkt-Matrix (RePro-Geräte)

Die Komponenten-Produkt-Matrix (Tabelle 15) zeigt die Produktauswahl und die darin eingesetzten Komponenten. Diese RePro-Geräte wurden nach den im ElektroG vorgesehenen Sammelgruppen sortiert.

Die Komponenten Leiterplatte und Lote/Kontaktflächen werden in nahezu allen Produkten eingesetzt, während sich für die anderen Komponenten anwendungsspezifischere Differenzierungen ergeben.

Tabelle 15: Komponenten-Produkt-Matrix

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung	Leiterplatten	Lote, Kontakt-flächen	Kobalthaltige Batterien	Bildschirmbe-schichtung, Leuchtstoffe	LED	Magnete	Laser/ Opto-elektronik
Geräte der SG 3 (Informations-, Telekommunikationsgeräte, Unterhaltungselektronik)	3.1	PC	x	x				x	x
	3.2	Laptop	x	x	x	x	x	x	x
	3.3	Tablet Computer	x	x	x	x	x	x	x
	3.4	Externe Festplatten	x	x	x			x	x
	3.5	USB Stick	x	x					
	3.6	Beamer	x	x			x		x
	3.7	Multifunktionsdrucker, Scanner, Laserdrucker	x	x		x	x	x	x
	3.8	Schnurloses Heimtelefon	x	x	x			x	
	3.9	Navigationsgerät	x	x	x	x	x		
	3.10	Handy	x	x	x	x	x	x	x
	3.11	Smartphone	x	x	x	x	x	x	x
	3.12	Digitalkamera	x	x	x	x	x		x
	3.13	Camcorder/Videokamera	x	x	x	x	x		x
	3.14	LCD Monitor	x	x		x	x		

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung	Leiterplatten	Lote, Kontakt-flächen	Kobalthaltige Batterien	Bildschirmbe-schichtung, Leuchtstoffe	LED	Magnete	Laser/ Opto-elektronik
	3.15	LCD Fernseher	x	x		x	x		
	3.16	CRT Geräte	x	x		x			
	3.17	Fernbedienung	x	x	x				x
	3.18	DVD Spieler	x	x				x	x
	3.19	Tragbare Videospiele	x	x	x	x	x	x	
	3.20	Videospielkonsolen	x	x			x	x	x
	3.21	MP3 Player	x	x	x	x	x		
	3.22	Lautsprecher		x				x	
	3.23	Kopfhörer		x				x	
Geräte der SG 4 (Gasentla-dungslampen)	4.1	Energiesparlampen		x		x			
	4.2	LED Lampen		x		x	x		
	4.3	Leuchtstoffröhren		x		x			
Geräte der SG 5 (Haushalts-kleingeräte, Beleuchtungs-körper, Werkzeuge, Spiel-zeuge, Sport- und Freizeit-geräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kon-trollinstrumente)	5.1	Bohrmaschine, batte-riegetrieben	x	x	x			x	
	5.2	Wecker, batteriege-trieben	x	x					x
	5.3	Kaffeemaschine	x	x					
	5.4	Rasierapparat	x	x	x				

3.5 Produktbezogene Quantifizierung der Metalle

3.5.1 Literaturstudie

Für die ausgewählten Elektronikprodukte, die 30 RePro-Geräte, wurden Recherchen zur Quantifizierung der ausgewählten Metalle angestellt. Als wesentliche Quellen wurden dazu u. a. folgende Studien ausgewertet: RECHARGE (2010), Buchert et al. (2012), Chancerel (2010), Du/ Graedel (2011), Huisman et al. (2007), Gille und Meier (2012), MoE /METI (2010), Oguchi et al. (2007), Oguchi et al. (2011), Rotter et al. (2012), USGS (2008).

Die zusammenfassende Bewertung der Studien ermöglicht einen umfassenden Überblick. Die Auswertung zeigt aber auch, dass sich sowohl zwischen unterschiedlichen Studien als auch innerhalb einzelner Studien erhebliche Abweichungen für die Metallgehalte pro Produkt ergeben. Diese Spannbreiten ergeben sich beispielsweise auch aus der hohen Dynamik im Markt der Elektro(nik)gräte (vgl. Kap. 3.1) und wurden übernommen.

Generell sind zwei Typen von Quellen zu unterscheiden: Einige Quellen beziehen sich auf Herstellerangaben und betrachten die eingesetzte Rohstoffmenge. Weitaus mehr Studien beziehen sich jedoch auf Laboruntersuchungen von Elektroaltgeräten. Die Vergleichbarkeit ist daher nicht immer gegeben. Um hier zu einheitlich Angaben in der Einheit Metallmasse pro Produkt zu kommen, mussten Annahmen zum Produktgewicht ergänzt werden. Anhang 10.1.1 zeigt die Gesamtübersicht der verschiedenen Quellen zu Metallgehalten und Produktgewichten.

3.5.2 Identifizierung von Datenlücken

Nach der Literaturstudie zur Lokalisierung und Quantifizierung der ausgewählten Metalle in den RePro-Geräten wurden Datenlücken festgestellt.

Es konnten kaum verlässliche Angaben zu Gallium in optoelektronischen Komponenten ermittelt werden. Verschiedene Studien stellen die zunehmende Relevanz entsprechender Komponenten heraus (vgl. USGS 2012), verzichten jedoch auf eine konkrete Quantifizierung.

Für bestimmte Geräte wurden wegen ihrer Neuartigkeit bisher noch keine Analysen durchgeführt. Dies betrifft Tablet Computer, bei denen der Unterschied zum von Laptop unklar ist, und Smartphones, für welche Buchert et al. (2012) lediglich eine Extrapolation auf Basis von Handys vornimmt.

Mit Blick auf Yttrium und Neodym ist festzustellen, dass hierzu zwar bereits einige Untersuchungen vorliegen, jedoch signifikante Unterschiede bei den Angaben zu den Einsatzmengen bestehen. So ergeben beispielsweise zwei Untersuchungen zu Neodym in Festplatten von Laptops Werte von 5.600 mg in 2011 (Schüler et al. 2011) und 2.100 mg in 2012 (Buchert et al. 2012).

Die Literaturrecherche verdeutlicht insgesamt, dass neben fehlenden Daten auch große Spannbreiten vorliegen, so dass auch hier Bedarf für weitere empirische Untersuchungen gesehen wurde. Die Relevanz dieser Spannbreiten lässt sich jedoch erst unter Berücksichtigung der jeweiligen Produktmengen bestimmen.

Die folgende Auflistung unterteilt die ausgewählten Produkte in drei Gruppen:

- Produkte mit vollständiger oder ausreichender Datenlage,
- Produkte mit vernachlässigbaren Datenlücken und
- Produkte mit relevanten Datenlücken, die als Kandidaten für weitere empirische Untersuchungen vorgeschlagen werden.

Tabelle 16 zeigt die Einteilung der ausgewählten Produkte (aus Tabelle 15) in diese drei Gruppen entsprechend der Einschätzung der Datenlage. Die identifizierten Datenlücken dienen als Grundlage für die empirischen Untersuchungen in Kapitel 3.6).

Tabelle 16: Einschätzung der Datenlage zu den Metallgehalten der 30 ausgewählten Produkte

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung	Gruppe 1: Ausreichende Daten	Gruppe 2: Vernachlässigbare Datenlücken	Gruppe 3: Zu schließende Datenlücken	Bemerkungen
Geräte der SG 3 (Informations- und Telekommunikationsgeräte)	3.1	PC	X			
	3.2	Laptop	X			
	3.3	Tablet Computer			X	Es ist unklar, inwiefern sich Tablets von Laptops unterscheiden.
	3.4	Externe Festplatten		X		Es fehlen Angaben zu Tantal und Zinn.
	3.5	USB Stick	X			
	3.6	Beamer			X	Hierzu fehlen Angaben mit Ausnahme der Leiterplatte vollständig.
	3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner und Laserdrucker			X	Hierzu liegen nur wenige Daten vor, die sich zudem entweder nur auf die Leiterplatten beziehen oder bei denen die Funktionalität der betrachteten Geräten unklar ist.
	3.8	Schnurloses Heimtelefon	X			
	3.9	Navigationsgerät			X	Hier fehlen bisher Angaben zu Gallium, Yttrium und Tantal.
	3.10	Handy	X			
	3.11	Smartphone			X	Basierend auf Buchert et al. (2012) können eventuell Werte von Handys hochgerechnet werden.
	3.12	Digitalkamera	X			
	3.13	Camcorder/Videokamera	X			
	3.14	LCD Monitor		X		Siehe LCD Fernseher

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung	Gruppe 1: Ausreichende Daten	Gruppe 2: Vernachlässig-bare Datenlü-cken	Gruppe 3: Zu schließende Datenlücken	Bemerkungen
	3.15	LCD Fernseher		X		Hier fehlen Daten zu Tantal, das aufgrund der Komplexität der Steuerungselektronik erwartet werden könnte.
	3.16	CRT Geräte			X	CRT Fernseher und Monitor: Hier fehlen Daten zu Yttrium, das in der Bildschirmbeschichtung eingesetzt wird.
	3.17	Fernbedienung	X			
	3.18	DVD Spieler			X	Es fehlen belastbare Daten zu Gallium, evtl. könnten hier bezüg-lich der Größenordnung auf die Untersuchungen bei Laptops zu-rückgegriffen werden.
	3.19	Tragbare Videospiele	X			
	3.20	Videospielkonsolen	X			
	3.21	MP3 Player			X	Hierzu konnten bisher keine Daten zu Seltenen Erden ermittelt werden, verschiedene (populärwissenschaftliche) Veröffentli-chungen betonen jedoch die Bedeutung von Seltenen Erden für die Miniaturisierung solcher Geräte.
	3.22	Lautsprecher		X		Hierzu liegen praktische keine Daten vor, zu erwarten sind vor allem relevante Mengen an Neodym (Daten liegen hierzu nur für Lautsprechereinheiten in Handys vor, die aber auf Basis der Magnetgewichte hochgerechnet werden könnten).
	3.23	Kopfhörer		X		Siehe Lautsprecher
Geräte der SG 4 (Gasent-ladungslampen)	4.1	Energiesparlampen		X		Hierzu liegen Daten für Yttrium vor. Zinn, Gold, Silber und Palla-dium sind in prinzipiell vernachlässigbaren Mengen zu erwarten.

Gruppe	Lfd. Nr.	Bezeichnung	Gruppe 1: Ausreichende Daten	Gruppe 2: Vernachlässig-bare Datenlü-cken	Gruppe 3: Zu schließende Datenlücken	Bemerkungen
	4.2	LED Lampen	X			
	4.3	Leuchtstoffröhren		X		Leuchtstoffröhre: siehe Energiesparlampe.
Geräte der SG 5 (Haus-haltskleingeräte, Be-leuchtungskörper, elekt-rische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Über-wachungs- und Kontrol-linstrumente)	5.1	Bohrmaschine, batteriebe-trieben		X		Es fehlen noch Angaben zu Zinn und Silber, die insgesamt aber vernachlässigbar sein dürften.
	5.2	Wecker, batteriebetrieben		X		Es fehlen Angaben zu Silber und Zinn.
	5.3	Kaffeemaschine		X		Hier fehlen Daten zu Silber und Zinn, die aber vernachlässigbar sein dürften.
	5.4	Rasierapparat	X			

Quelle: Eigene Darstellung

3.6 Chemische Analyse zur Lokalisierung und Quantifizierung der RePro-Metalle

Zur Schließung der in Abschnitt 3.5.2 festgestellten Datenlücken (Tabelle 16, Spalte „Gruppe 3“) wurden 30 Geräte chemisch analysiert. Die Geräte wurden im Frühjahr und Sommer 2012 stichprobenartig aus Elektroaltgeräten verschiedener Quellen ausgewählt. Entsprechend der Komponenten-Produkt-Matrix (Tabelle 15) und der Metall-Komponenten-Matrix (Tabelle 14) wurden die RePro-Metalle und entsprechenden Bauteile ausgewählt.

Die Tabelle 17 fasst die ausgewählten Geräte und Bauteile sowie die analysierten Metalle zusammen.

Tabelle 17: Ausgewählte Geräte, ressourcenrelevante Bauteile und die analysierten Metalle

Gerät	Ressourcenrelevante Bauteile	Analysierte Metalle
3.3 Tablet Computer	Display Platine Hintergrundbeleuchtung CCFL Lautsprecher	Indium Zinn, Silber, Gold, Tantal, Gallium Yttrium, Europium, Lanthan Neodym
3.6 Beamer	Platinen Optoelektronik Mikrospiegelaktor Brennkammer aus Lampe	Silber, Zinn, Tantal, Gallium Gallium, Yttrium Gallium, Yttrium
3.7 Multifunktionsdrucker	Platinen Scan-Einrichtung LED	Gallium, Tantal Gallium Gallium, Yttrium, Indium
3.9 Navigationsgeräte	Display Platine LED Lautsprecher	Indium Gallium, Tantal Indium, Gallium, Yttrium, Europium, Cer Neodym
3.11 Smartphone	Display Platine Lautsprecher Hintergrundbeleuchtung LED	Indium Gallium, Tantal, Zinn Neodym Indium, Gallium, Yttrium
3.21 MP3 Player	Display Platine LED	Indium Gallium, Tantal Indium, Gallium, Yttrium

3.6.1 Technische und normative Grundlagen der chemischen Analysen

Die für die chemische Analyse eingesetzten Geräte sind in Tabelle 18 gelistet.

Tabelle 18: Geräteliste und Hersteller

Gerät	Gerätename	Hersteller	Abkürzung
Schneidmühle	SM100	Retsch	
Mikrowellenaufschlusssystem	Multiwave B30MC02A Multiwave	Perkin Elmer Anton Paar	
Schmelzapparatur	-	Schöps	
Flammen-Atomabsorptionsspektrometer	contrAA 700	Analytik Jena	F-AAS
Graphitrohr-Atomadsorptionsspektrometer	contrAA 700	Analytik Jena	GF-AAS

Gerät	Gerätename	Hersteller	Abkürzung
Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma	PE-Optima 7000 DV	Perkin Elmer	ICP
Röntgenfluoreszenzanalyse	-	Horiba	RFA

3.6.2 Probenvorbereitung

Die Geräte wurden erfasst, gewogen, fotografiert und beschrieben (Tabelle 19). Anschließend wurden die Geräte manuell demontiert und die ressourcenrelevanten Bauteile entnommen.

Tabelle 19: Dokumentation der untersuchten Geräte (Bildquelle: Ökopol GmbH)

Gerät inkl. lfd. Nr. des RePro-Geräts	Beispielhafte Fotos	Zustand
3.3 Tablet-Computer		Zerstört; nicht mehr funktionsfähig Glas beschädigt, Display mit Sprüngen
3.6 Beamer 4 Stück		Zwei zerstört; alle nicht mehr funktionsfähig; keiner vollständig
3.7 Multifunktionsdrucker 3 Stück		einer zerstört und nicht vollständig; zwei vollständig; alle nicht mehr funktionsfähig
3.9 Navigationsgeräte 14 Stück	 	Alle vollständig; teilweise beschädigt bzw. nicht mehr funktionsfähig. Nur unbeschädigte Displays wurden analysiert.
3.11 Smartphone		Vollständig;
3.21 MP3 Player 8 Stück		Nicht mehr funktionsfähig; zum Teil nicht mehr vollständig

Die Probenvorbereitung für die chemischen Analysen wird im Folgenden detailliert beschrieben. Falls mehrere Geräte einer Art zur Verfügung stand, wurden die entnommenen Bauteile zerkleinert und zu einer Probe zusammengefasst.

3.6.2.1 3.3 Tablet Computer

Für die Homogenisierung der Platinen wurden diese mit der Schneidmühle SM 100 (Retsch) bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Das Displayglas wurde für den folgenden Aufschluss gebrochen und ein definierter Teil für die Analytik entnommen. Das Quecksilber der CCFL-Röhre wurde unter Beachtung der arbeitssicherheitstechnischen Bestimmungen ausgedampft und die entfrachtete Röhre anschließend gemörsert. Der Aufschluss des Lautsprechers konnte ohne weitere Zerkleinerung erfolgen.

3.6.2.2 3.6 Beamer

Die Platinen des Beamers wurden mit der Schneidmühle SM 100 (Retsch) bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Die Optoelektronik besteht aus dem Mikrospiegelaktor und einer Lampe. Die Brennkammer der Lampe wurde von dem Reflektorschirm manuell getrennt und der Mikrospiegelaktor aus dem Beamer wurde aus seinem Rahmen getrennt. Beide Proben wurden mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen.

3.6.2.3 3.7 Multifunktionsdrucker

Für die Homogenisierung der Platinen und der Scan-Einrichtung wurden diese mit der Schneidmühle bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Die LEDs wurden mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen.

3.6.2.4 3.9 Navigationsgeräte

Für die Homogenisierung der Platinen wurden diese mit der Schneidmühle SM 100 (Retsch) bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Das Displayglas wurde für den folgenden Aufschluss zerbrochen und ein definierter Teil für die Analytik entnommen. Die LEDs wurden mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen. Der Aufschluss der Lautsprecher konnte ohne weitere Probenvorbereitung erfolgen.

3.6.2.5 3.11 Smartphone

Für die Homogenisierung der Platinen wurden diese mit der Schneidmühle SM 100 (Retsch) bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Das Displayglas wurde für den folgenden Aufschluss zerbrochen und ein definierter Teil für die Analytik entnommen. Die LEDs wurden mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen. Der Aufschluss des Lautsprechers konnte ohne weitere Zerkleinerung erfolgen.

3.6.2.6 3.21 MP3 Player

Für die Homogenisierung der Platinen wurden diese mit der Schneidmühle SM 100 (Retsch) bis zu einer Korngröße von 2 mm gemahlen. Das Displayglas wurde für den anschließenden Schmelzaufschluss grob zerkleinert und ein definierter Teil für die Analytik entnommen. Dieser wurde mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen. Die LEDs wurden mit flüssigem Stickstoff eingefroren und gemahlen.

3.6.2.7 Probenaufschluss

Der Aufschluss der Bauteile erfolgte vor dem Hintergrund der jeweilig unterschiedlichen Basismaterialien, z. B. Epoxidharz oder Glas, und der zu analysierenden Elemente in unterschiedlicher Weise. Tabelle 20 fasst die Bauteile, die jeweils gewählte Aufschlussmethode und das genutzte Lösemittel zusammen.

Die LEDs wurden unter Stickstoff gemahlen und in Königswasser offen aufgeschlossen.

Für die Tantal-Bestimmung wurden die Proben durch Mahlen homogenisiert, verascht und mit Li-Tetraborat geschmolzen. Die Tabletten wurden in HNO_3 gelöst. Die Lösungen wurden nach dem Aufschluss filtriert und das Filtrat gegebenenfalls mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse auf seine Bestandteile untersucht.

Tabelle 20: Aufschlussmethoden

Bauteil	Methode	Lösungsmittel/Bedingungen
Platinen von Smartphone, Navigationsgeräten, Tablet-Computer, Beamer, Multifunktionsdrucker, MP3 Player, Scan-Einrichtung, Lautsprecher, Displaygläser Einwaage: 0,5 g Nachbehandlung: Filtration	DIN 16174/16171 in der Mikrowelle	Druck: max. 28 bar Zeit: 45 Minuten Leistung: max. 1000W Königswasser: 1,3 ml 65 %-ig Salpetersäure/3,6 ml 37 %-ig Salzsäure
LEDs, Mikrospiegelaktor Einwaage: 50 mg	Mikrowelle	Zeit: 60 Minuten Leistung: max. 800W Königswasser/40 %-ig Flusssäure

Bauteil	Methode	Lösungsmittel/Bedingungen
Displaygläser der MP3 Player und Brennkammer	Schmelzaufschluss	Li-Tetraborat 65 %-ig Salpetersäure Bestimmungsgrenzen gemäß DIN 32645 < 0,25 g/kg
CCFL des Tablet-Computers Einwaage: 0,5 g Nachbehandlung: Filtration	Aufschluss in der Mikrowelle (Multi-wave B30MC02A)	Druck: max. 28 bar Zeit: 45 Minuten Leistung: max. 1000W 10 ml 37 %-ig Salzsäure
Platinen von Smartphone, Navigationsgeräten, Tablet-Computer, Beamer, Multi-funktionsdrucker, MP3 Player für die Tantal-Bestimmung Einwaage: 0,1 g	Veraschung mit Schmelzaufschluss	Schmelzschritte: 4 Zeit: 20,5 – 26,5 Minuten Schmelztemperatur: 1100 – 1200 °C Li-Tetraborat 65 %-ige Salpetersäure

3.6.3 Messstrategie

Die jeweilige Messstrategie wurde aufgrund der Probenmenge und der zu analysierenden Elemente nach Tabelle 21 für die ressourcenrelevanten Bauteile einzeln angepasst. Für die Bestimmung mehrerer Elemente gleichzeitig und aufgrund der jeweiligen Matrix des Basismaterials wurde die entsprechende Bestimmung der Elemente über die AAS oder ICP (siehe Tabelle 21) gewählt. So wurde z. B. der Indiumgehalt der LEDs anhand der ICP bestimmt.

Tabelle 21: Messstrategie für die verschiedenen Geräte und Bauteile

Gerät	Bauteil	Metall	Messmethode
3.3 Tablet Computer	Display	Indium	F-AAS
	Platine	Zinn, Silber, Gold	F-AAS,
		Gallium	GF-AAS
		Tantal	ICP
	Hintergrundbeleuchtung CCFL	Yttrium, Europium, Lanthan	F-AAS
	Lautsprecher	Neodym	F-AAS
3.6 Beamer	Platinen	Silber, Zinn, Tantal	F-AAS,
		Gallium	ICP
	Optoelektronik (Lampe, Mikrospiegelaktor)	Gallium, Yttrium	ICP
.7 Multifunktionsdrucker	Platinen	Gallium,	GF-AAS
		Tantal	ICP
	Scan-Einrichtung	Gallium	GF-AAS
	LEDs	Indium, Gallium, Yttrium	ICP
3.9 Navigationsgeräte	Display	Indium	F-AAS
	Platine	Gallium	GF-AAS,
		Tantal	ICP
	LED	Indium, Gallium, Yttrium, Europium, Cer	ICP
	Lautsprecher	Neodym	F-AAS
3.11 Smartphone	Display	Indium	F-AAS
	Platine	Zinn	F-AAS
		Gallium	GF-AAS
		Tantal	ICP

Gerät	Bauteil	Metall	Messmethode
	Lautsprecher	Neodym	F-AAS
	Hintergrundbeleuchtung LED	Indium, Gallium, Yttrium	ICP
3.21 MP3 Player	Platine	Gallium	ICP
		Tantal	ICP
	Display	Indium	F-AAS
	LED	Indium, Gallium, Yttrium	ICP

3.6.4 Ergebnisse der chemischen Analysen

Die Ergebnisse der chemischen Analysen finden sich in der Tabelle 22. Die Bestimmungsgrenzen der verschiedenen Metalle berechneten sich nach DIN 32645. Anzumerken ist, dass die Probemenge der LEDs sowie das Display des Smartphones nicht für eine Doppelbestimmung ausreichten, so dass hier abweichend von den anderen Analysen nur eine Einfachbestimmung zum Ergebnis führte. Durch das geringe Probenvolumen der LEDs des Smartphones, des Mikrospiegelaktors und der Brennkammer des Beamers und der Displays der MP3 Player errechneten sich die jeweiligen hohen Bestimmungsgrenzen, bzw. Nachweisgrenzen.

Der Metallgehalt des Displayglases wurde extrapoliert.

In Tabelle 23 sind die Mittelwerte der gemessenen Metallmengen bezüglich der einzelnen Bauteile angegeben.

Tabelle 22: RePro-Metalle in Bauteilen ausgewählter Elektroaltgeräte

Gerät	Gewicht (g)	Bauteil	Anz./Gerät	Masse Bauteil (g)	Metall	Menge (mg/kg)
3.3 Tablet Computer	910	Platinen	4	6,28 – 152,45	Gallium	2 - 3
					Gold	416 – 1.175
					Silber	39 - 241
					Zinn	9.641 – 39.545
					Tantal	135
		Display	1	147,97	Indium	193
		CCFL	1	0,431	Yttrium	4.386
					Europium	287
					Lanthan	0
		Lautsprecher	1	4,17	Neodym	83.208
3.6 Beamer	2640	Platinen	3	62,42 – 127,57	Gallium	1 - 4
					Silber	51 - 251
					Zinn	15.320 – 28.971
					Tantal	< 100
		Mikrospiegelaktor	1	22,84	Gallium	< 50
					Yttrium	< 50
		Lampe (Brennkammer)	1	22,84	Gallium	< 250
					Yttrium	< 250
3.7 Multifunktionsdrucker	3280 - 4660	Platine	2	23,27 – 135,71	Gallium	0,002 - 0,020
					Tantal	< 100

Gerät	Gewicht (g)	Bauteil	Anz./Gerät	Masse Bauteil (g)	Metall	Menge (mg/kg)
		Scaneinrichtung	1	11,595	Gallium	0
		LEDs	0 - 7	0,062	Gallium	690
					Yttrium	< 50
					Indium	< 50
3.9 Navigationsgerät	134,55 – 340,09	Platine	1 - 3	2,06 - 36,54	Gallium	0,3 - 0,6
					Tantal	469
		LED	4 - 8	0,013	Gallium	248
					Yttrium	526
					Indium	< 50
					Europium	68
					Cer	54
		Display	1	9,061 – 21,977	Indium	147 - 281
		Lautsprecher	1	1,98 – 13,87	Neodym	75 - 415
3.11 Smartphone	116,06	Platine	1	24,4	Gallium	2 - 6
					Zinn	17.572 – 31.184
					Tantal	< 100
		Display	1	5,29	Indium	460
		Lautsprecher	1	1,34	Neodym	89.818
		LED	6	0,0059	Gallium	490
					Indium	< 200
					Yttrium	< 200
3.21 MP3 Player	19,09 – 34,33	Platinen	1 - 2	5,46 – 12,07	Gallium	50 - 54
					Tantal	< 100
		Display	0 - 1	1,10 – 1,65	Indium	< 250
		LED	1	0,0135 - 0,0646	Indium	67
					Gallium	< 100
					Yttrium	< 100

Tabelle 23: Zusammenfassung der Mittelwerte: Ressourcenrelevante Metalle in Bauteilen ausgewählter Elektroaltgeräte

Gerät	Ø Gewicht (g)	Bauteil	Ø Anzahl pro Gerät	Ø Masse Bauteil (g)	Metall	Ø Konzentration (mg/kg)	Ø Metallmenge pro Produkt (mg)
3.3 Tablet Computer	910	Platinen	4	43,973	Gallium	2	0,352
					Gold	747	131,391
					Silber	150	26,384
					Zinn	29.977	5273
					Tantal	135	23,745
		Display	1	147,97	Indium	193	28,558
		CCFL	1	0,431	Yttrium	4.386	1,89

Gerät	Ø Gewicht (g)	Bauteil	Ø Anzahl pro Gerät	Ø Masse Bauteil (g)	Metall	Ø Konzentration (mg/kg)	Ø Metallmenge pro Produkt (mg)
					Europium	287	0,124
					Lanthan	0	0
		Lautsprecher	1	4,17	Neodym	83.208	346,977
3.6 Beamer	2640	Platinen	3	85,387	Gallium	2,9	0,743
					Silber	177	45,341
					Zinn	23.027	5899
					Tantal	< 100	< 25,616
		Mikrospiegelaktor	1	22,84	Gallium	< 50	< 1,142
					Yttrium	< 50	< 1,142
		Lampe (Brennkammer)	1	22,84	Gallium	< 250	< 5,710
					Yttrium	< 250	< 5,710
3.7 Multifunktionsdrucker	3906,67	Platine	2	79,49	Gallium	0,011	0,002
					Tantal	< 100	< 15,898
		Scaneinrichtung	1	11,595	Gallium	0	0
		LEDs	2,3	0,062	Gallium	690	0,1
					Yttrium	< 50	< 0,007
					Indium	< 50	< 0,007
3.9 Navigationsgerät	199,9	Platine	2	16,94	Gallium	0,45	0,015
					Tantal	470	15,924
		LED	6	0,013	Gallium	248	0,0193
					Yttrium	526	0,041
					Indium	< 50	< 0,004
					Europium	68	0,005
					Cer	54	0,00
		Display	1	14,65	Indium	218	3,194
		Lautsprecher	1	5,51	Neodym	182	1,003
3.11 Smartphone	116,06	Platine	1	24,4	Gallium	3,8	0,093
					Zinn	26.574	648,406
					Tantal	< 100	< 2,44
		Display	1	5,29	Indium	460	2,433
		Lautsprecher	1	1,34	Neodym	89.818	120,356
		LED	6	0,0059	Gallium	490	0,017
					Indium	< 200	< 0,007
					Yttrium	< 200	< 0,007
	27,07	Platinen	1	8,13	Gallium	52	0,423
					Tantal	< 100	< 0,813

Gerät	Ø Gewicht (g)	Bauteil	Ø Anzahl pro Gerät	Ø Masse Bauteil (g)	Metall	Ø Konzentration (mg/kg)	Ø Metallmenge pro Produkt (mg)
3.21 MP3 Player		Display	1	1,401	Indium	< 250	< 0,350
		LED	1	0,036	Indium	67	0,002
					Gallium	< 100	< 0,004
					Yttrium	< 100	< 0,004

Soweit die Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze lagen, wurden sie in den weiteren Berechnungen mit „0“ berücksichtigt.

Aufgrund der begrenzten Anzahl von Geräten stellen die Ergebnisse ein Schlaglicht dar, das nicht die Variabilität der Zusammensetzungen durch unterschiedliche Modelle einer Geräteart und durch Veränderungen der Zusammensetzung über die Zeit abbilden kann. Zusätzlich kann die Beschädigung einzelner Geräte, wie z. B. der CCFL-Röhre des Tablet Computers, die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Eine quantitative Fehlerbetrachtung kann vor dem Hintergrund des begrenzten Probenumfangs nicht erfolgen.

3.7 Stoffstrombezogene Quantifizierung der Metalle in den RePro-Geräten

Um aus den produktbezogenen Metallgehalten Rückschlüsse auf Optimierungspotenziale in der Entsorgung ziehen zu können, erfolgten Marktrecherchen bezüglich der in Verkehr gebrachten Produktmengen.

3.7.1 Marktrecherchen

Im Mittelpunkt der Marktrecherchen standen Verkaufszahlen von Fachverbänden und Marktforschungsunternehmen (z. B. ZVEI, GfK etc.). Als Bezugsjahr wurde 2010 gewählt.

Ein Teil der Mengenangaben wurden aus dem parallel laufenden Ufoplan-Forschungsprojekt „Ermittlung und Erschließung des Energie- und Ressourceneffizienzpotenzials von Geräten der Unterhaltungselektronik“ (Prakash und Gröger 2017), übernommen. Die Daten wurden in Tabelle 24entsprechend gekennzeichnet („Datenübernahme von IZM“), die jeweiligen Quellen sind dem Bericht jenes Projekts zu entnehmen. Im Bereich der Sammelgruppe 4 wurden ebenfalls Daten aus einem weiteren Forschungsvorhaben im Auftrag des UBA zu übernommen (Sander et.al 2015).

Eine Schwierigkeit bestand in der exakten Abgrenzung der Produktklassen. Ein Beispiel sind externe Festplatten, die in technisch sehr ähnlicher Form auch als Speichermedium in Servern eingesetzt werden. Der Bereich der gewerblichen Nutzung in Servern übersteigt die private Nutzung aber bei weitem. Dennoch wurde den Vorgaben des ElektroG entsprechend auf private oder sowohl privat als auch gewerblich genutzte Mengen (dual use Produkte) abgestellt.

Tabelle 24 zeigt die Ergebnisse der Recherchen zu Produktgewicht und Marktvolumen im Jahr 2010. Wo sich aus den Untersuchungen zu den produktbezogenen Metallgehalten Hinweise ergaben, dass zwischen unterschiedlichen Technologien unterschieden werden sollte, wurden technologiebezogene Mengenangaben recherchiert. Dies betrifft beispielsweise Hintergrundbeleuchtungen von Bildschirmen.

Tabelle 24: Produktgewicht und Marktvolumen der ausgewählten Elektrogeräte und ressourcenrelevanten Metalle

Gruppe	Lfd. Nr	Produkt		Durchschnittliches Produktgewicht in g (Angaben gerundet, soweit nicht anders vermerkt nach Chancerel 2010 und Oguchi 2007)	Geräteabsatz in Deutschland in Stück, (Bezugsjahr 2010 soweit nicht anders angegeben)	Quelle/Anmerkungen
Geräte der SG 3 (Informations- und Telekommunikationsgeräte)	3.1	PC		15.000	1.600 000	Datenübernahme von IZM
	3.2	Laptop	mit CCFL	2.900	142.000	Datenübernahme von IZM
			mit LED		6.958.000	Datenübernahme von IZM
	3.3	Tablet Computer		610	800.000	Gewicht nach www.apple.de für ein Ipad2, Geräteabsatz nach ZVEI (2012)
	3.4	Externe Festplatten		575	3.100.000	Zahlen für 2009, D IKT 5,1 %, Durchschnittspreis 86 Euro; Angaben zum Gewicht nach Mohite und Zhang (2005)
	3.5	USB Stick		13	11.800.000	ZVEI (2012)
	3.6	Beamer		2.000	244.000	VTRON (2011)
	3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner und Laserdrucker		5.600	3.000.000	ZVEI (2012)
	3.8	Schnurloses Heimtelefon		230	5.600.000	ZVEI (2012)
	3.9	Navigationsgerät		300	3.500.000	ZVEI (2012)
	3.10	Handy		110	14.600.000	Datenübernahme von IZM
	3.11	Smartphone		110	7.700.000	Datenübernahme von IZM
	3.12	Digitalkamera		240	8.200.000	Datenübernahme von IZM

Gruppe	Lfd. Nr	Produkt		Durchschnittliches Produktgewicht in g (Angaben gerundet, soweit nicht anders vermerkt nach Chancerel 2010 und Oguchi 2007)	Geräteabsatz in Deutschland in Stück, (Bezugsjahr 2010 soweit nicht anders angegeben)	Quelle/Anmerkungen
	3.13	Camcorder/Videokamera		600	800.000	Datenübernahme von IZM
	3.14	LCD Monitor	mit CCFL	3.340	2.418.000	Datenübernahme von IZM, Technologiesplit nach China Economic News Service (2010)
			mit LED		171.600	Datenübernahme von IZM, Technologiesplit nach China Economic News Service (2010)
	3.15	LCD Fernseher	mit CCFL	8.600	7.553.000	Datenübernahme von IZM, Technologiesplit nach China Economic News Service (2010)
			mit LED		747.000	Datenübernahme von IZM, Technologiesplit nach China Economic News Service (2010)
	3.16	CRT Geräte	Monitor	10.000	0	Datenübernahme von IZM, Technologiesplit nach China Economic News Service (2010)
			Fernseher	14.500	30.000	Datenübernahme von IZM
	3.17	Fernbedienung		90	35.300.000	7 Fernbedienungen pro Haushalt (bitkom 2011), 40,3 Mio. Haushalte, 8 Jahre Nutzungsdauer

Gruppe	Lfd. Nr	Produkt	Durchschnittliches Produktgewicht in g (Angaben gerundet, soweit nicht anders vermerkt nach Chancerel 2010 und Oguchi 2007)	Geräteabsatz in Deutschland in Stück, (Bezugsjahr 2010 soweit nicht anders angegeben)	Quelle/Anmerkungen
	3.18	DVD Spieler	3.200	3.500.000	Datenübernahme von IZM
	3.19	Tragbare Videospiele	165	1.220.000	Statista (2013c)
	3.20	Videospielkonsolen	1.550	3.100.000	Datenübernahme von IZM
	3.21	MP3 Player	50	4.600.000	Datenübernahme von IZM
	3.22	Lautsprecher (Home Cinema, Audio Home, sep. Lautsprecherboxen)	1.635	2.600.000	ZVEI (2012)
	3.23	Kopfhörer	100	8.100.000	ZVEI (2012), Gewicht nach vgl. Pioneer SE-MJ3 Bügel-Kopfhörer
Geräte der SG 4 (Gasentladungslampen)	4.1	Energiesparlampen	100	105.000.000	Sander et.al (2015)
	4.2	LED Lampen	250	3.500.000	2 % Marktanteil bei 176 Mio. Gesamtmarkt, Gewicht nach Information von Sander et al. (2011)
	4.3	Leuchtstoffröhren	144	68.000.000	Sander et.al (2015)
	5.1	Bohrmaschine, batteriebetrieben	2.470	2.600.000	RECHARGE (2010)
	5.2	Wecker, batteriebetrieben	71	6.300.000	Prodcom Cat 26.52.14.00. Uhren mit Kleinuhr-Werk; Wecker und Wanduhren, andere Uhren; Annahme Anteil batteriebetriebener Wecker ein Drittel

Gruppe	Lfd. Nr	Produkt	Durchschnittliches Produktgewicht in g (Angaben gerundet, soweit nicht anders vermerkt nach Chancerel 2010 und Oguchi 2007)	Geräteabsatz in Deutschland in Stück, (Bezugsjahr 2010 soweit nicht anders angegeben)	Quelle/Anmerkungen
Geräte der SG 5 (Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente)	5.3	Kaffeemaschine	1.000	2.800.000	Annahme Durchschnittspreis 104 Euro (Fairnews 2010) Gewicht ohne Kanne
	5.4	Rasierapparat	310	1.300.000	Annahme Durchschnittspreis 150 Euro

Quelle: Eigene Erhebungen, Literaturauswertungen sowie Datenübernahme aus anderem Forschungsprojekt übernommen und mit „Datenübernahme von IZM“ gekennzeichnet, vgl. Prakash und Gröger (2017)

Aus der Kombination absoluter Produktmengen mit produktspezifischen Metallmengen ergeben sich die im Folgenden dargestellten insgesamt in den 30 RePro-Geräten in Deutschland in Verkehr gebrachten Mengen der RePro-Metalle. Die durch eigene chemische Analysen innerhalb des Projektes ermittelten Werte sind dabei fett gedruckt. Die Quellen für die weiteren finden sich in Anhang 10.1.1. Wenn wie bei Laptops Spannbreiten für unterschiedliche Technologien vorliegen (CCFL oder LED), wurde mit dem jeweiligen Minimum und Maximum gerechnet.

3.7.2 Gold

Gold befindet sich in vielen Geräten: von Laptops über Flachbildschirmen und Digitalkameras bis hin zu DVD-Playern mit dem höchsten hier ermittelten Maximalwert. Die produktspezifische Goldmenge ist erkennbar von der Komplexität der Produkte abhängig. Die größten Goldkonzentrationen befinden sich auf Leiterplatten. Die hohe Goldkonzentration in USB Sticks könnte ein Ergebnis des niedrigen Gewichts sein. Der außerordentlich hohe Maximalwert in DVD-Spielern ist nicht nachvollziehbar und ist innerhalb der verwendeten Quellen ein Ausreißer (vgl. Anhang 10.1.1). Insgesamt ergibt sich mit der Spannbreite von 1,1 bis 3,8 % an der globalen Goldnachfrage im EEG-Bereich jedoch ein nach wie vor plausibler Wert.

Tabelle 25: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Gold (Ergebnisse eigener Analysen mit * versehen)

SG	Produkt	Metallmenge Gold pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC	316 – 338	506 – 541
3.2	Laptop ohne Beleuchtungsdifferenzierung	246 – 250	1.747 – 1.775
	Laptop mit CCFL	100	14,2
	Laptop mit LED	100	696
3.3	Tablet Computer	131*	105
3.4	Externe Festplatten	5 – 5,1	15,5 – 15,8
3.5	USB Stick	2,4 – 192	27,9 – 2.270
3.6	Beamer	20	4,9
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner	13,3 – 15,7	39,8 – 47, 2
3.8	Schnurloses Heimtelefon	3,8 – 27,1	21,2 – 152
3.9	Navigationsgerät	30 – 48,2	105 – 169
3.10	Handy	50 – 68,4	730 – 998
3.11	Smartphone	30	231
3.12	Digitalkamera	4,9 – 155	40,3 – 1.272

SG	Produkt	Metallmenge Gold pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)	6,4 – 117	5,1 – 93,9
3.14	LCD Monitor Ohne Beleuchtungsdifferenzierung	28,3 – 113	73,3 – 293
	LCD Monitor mit CCFL	200	484
	LCD Monitor mit LED	200	34,3
3.15	LCD Fernseher Ohne Beleuchtungsdifferenzierung	47,5 – 183	394 – 1.519
	LCD Fernseher mit CCFL	140	1.057,4
	LCD Fernseher mit LED	140	104,6
3.16	CRT Monitor	8,5 – 13	0
	CRT Fernseher	6,8 – 170	0,2 – 5,1
3.17	Fernbedienung	0,4 – 6,6	14,6 – 234
3.18	DVD Spieler	46,5 – 628	163 – 2.198
3.19	Tragbare Videospiele	5 – 12,7	6,1 – 15,5
3.20	Videospielkonsolen	30,3 – 356	94 – 1.103
3.21	MP3 Player	7,5 – 55	34,5 – 253
3.22	Lautsprecher	1,2 – 4,1	3,1 – 10,7
3.23	Kopfhörer	Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampen	Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampen	2,5	8,8
4.3	Leuchtstoffröhren	0,03	2,0
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben	0,1	0,4
5.2	Wecker, batteriegetrieben	0,02	0,1
5.3	Kaffeemaschine	0,1	0,3
5.4	Rasierapparat	0,2	0,3
Summe			3,3 – 11,2 t

Der Anteil des Goldes in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an der globalen Anwendung von Gold in Elektro- und Elektronikgeräten (294 t) entspricht 1,1-3,8 %.

3.7.3 Silber

Diverse Produkte enthalten Silber. Höchste Werte wurden in DVD-Spielern festgestellt. Der hohe spezifische Wert von mehr als 5g pro Gerät erscheint nicht nachvollziehbar, liegt aber auch nur um den Faktor 2 höher als der für einen PC angegebene Wert. Der Wert für Tablet Computer erscheint im Vergleich zu Laptops niedrig. Insgesamt ist der Anteil aller Produkte mit nur 0,4 % - 1,1 % an der Gesamtnachfrage im EEG-Bereich relativ niedrig. Sehr hohe spezifische Werte werden auch für CRT-Geräte angegeben, die zwar angesichts des gewählten Referenzjahres 2010 für die in Verkehr gebrachten Mengen nicht bedeutend sind, jedoch noch eine hohe Relevanz im aktuellen Abfallstrom besitzen.

Tabelle 26: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Silber (Ergebnisse eigener Analysen mit * versehen)

Produkt			Metallmenge Silber pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC		804 – 2127	1.286 – 3.403
3.2	Laptop	Ohne Beleuchtungsdifferenzierung	437	3.103
		mit CCFL	440	62,5
		mit LED	440	3.062
3.3	Tablet Computer		**26,4***	21,1
3.4	Externe Festplatten		31 – 31,1	96,1 – 96,4
3.5	USB Stick		12,4 – 35,1	147 – 414
3.6	Beamer		**45,3***	11,1
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		29 – 98,7	87 – 296
3.8	Schnurloses Heimtelefon		294 – 305	1.645 – 1.709
3.9	Navigationsgerät		453 – 630	1.585 – 2.205
3.10	Handy		127 – 715	1.849 – 10.441
3.11	Smartphone		305	2.349
3.12	Digitalkamera		38,6 – 204	316 – 1.677
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		34,4 – 531	27,5 – 425
3.14	LCD Monitor	Ohne Beleuchtungsdifferenzierung	299	774
		mit CCFL	520	1.257
		mit LED	520	89,2

Produkt			Metallmenge Silber pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.15	LCD Fernseher	Ohne Beleuchtungsdifferenzierung	198 – 550	1.643 – 4.565
		mit CCFL	580	4.381
		mit LED		433
3.16	CRT Gerät	Monitor	110 – 210	0
		Fernseher	191 – 2650[13]	5,7 – 79,5
3.17	Fernbedienung		3,6 – 54,5	127 – 1.923
3.18	DVD Spieler		318 – 5024	1.113,3 – 17.584
3.19	Tragbare Videospiele		21,6 – 75,9	26,4 – 92,6
3.20	Videospielkonsolen		1051	3.261
3.21	MP3 Player		140 – 215	644 – 989
3.22	Lautsprecher		11,4	29,6
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampen		Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampen		10,1	35,4
4.3	Leuchtstoffröhren		0,3	20,4
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.2	Wecker, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.3	Kaffeemaschine		Keine Angabe	Keine Angabe
5.4	Rasierapparat		Keine Angabe	Keine Angabe
Summe				20,2 – 54,4 t

Der Anteil des Silbers in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in Elektro- und Elektronikgeräten (5.014 t) beträgt 0,4 – 1,1 %.

3.7.4 Palladium

Für Palladium ergeben sich die größten Gesamtmengen in Laptops, PCs, Handys, LCD Fernsehern und Videospielkonsolen – Geräten mit komplexen Leiterplatten. Insgesamt konnte hier bereits auf eine sehr breite Datenbasis zurückgegriffen werden, der Gesamtanteil an der globalen Verwendung in Elektro- und Elektronikgeäten scheint mit 2,6-6,9 % auch in einem plausiblen Bereich zu liegen.

[13] Die hohe Differenz zwischen Monitor und Fernseher kann teilweise über Zusatzfunktionen und Gerätegröße erklärt werden.

Tabelle 27: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Palladium

Produkt			Metallmenge Palladium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC		146 – 212	233 – 338
3.2	Laptop		49,3 – 79,5	350 – 564
		mit CCFL	40	5,7
		mit LED		278
3.3	Tablet Computer		Keine Angabe	Keine Angabe
3.4	Externe Festplatten		3 – 3,1	9,3 – 9,6
3.5	USB Stick		0,1	0,9
3.6	Beamer		4	1
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		2,5 – 8,7	7,6 – 26,1
3.8	Schnurloses Heimtelefon		0,8 – 22,4	4,5 – 125
3.9	Navigationsgerät		61,9	216,7
3.10	Handy		10 – 36,6	146 – 535
3.11	Smartphone		11	85
3.12	Digitalkamera		0,9 – 21	7,4 – 172
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		1,6 – 103	1,3 – 82,4
3.14	LCD Monitor		3,2 – 22,8	8,3 – 59
		mit CCFL	40	96,7
		mit LED		6,9
3.15	LCD Fernseher		0 – 15	0 – 125
		mit CCFL	44	332
		mit LED		32,9
3.16	CRT Gerät	Monitor	4,8 – 5	0
		Fernseher	2,3 – 67	0,1 – 2
3.17	Fernbedienung		0,1 – 3,6	3,9 – 127
3.18	DVD Spieler		9 – 15,7	31,4 – 55
3.19	Tragbare Videospiele		0,8 – 1,6	1 – 1,9
3.20	Videospielkonsolen		6,1 – 66,5	18,8 – 206
3.21	MP3 Player		1,5 – 5	6,9 – 23

Produkt		Metallmenge Palladium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.22	Lautsprecher	1,1	2,9
3.23	Kopfhörer	Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampen	Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampen	Keine Angabe	Keine Angabe
4.3	Leuchtstoffröhren	0,02	1,4
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben	0,04	0,1
5.2	Wecker, batteriegetrieben	0,01	0,03
5.3	Kaffeemaschine	0,02	0,1
5.4	Rasierapparat	0,1	0,1
Summe			1,1 – 2,9 t
Globale Anwendung Palladium in EEG			42 t
Anteil des Palladiums in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG			2,6 – 6,9 %

3.7.5 Kobalt

Wie die folgende Tabelle 28 zeigt, sind die mit Abstand größten Mengen an Kobalt in Laptops, Handys und Smartphones sowie in etwas geringerem Umfang in Digitalkameras zu finden. Niedrige produktspezifische Kobaltgehalte batteriebetriebener Geräte sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass hier Geräte ohne Batterie oder mit Alkali-Mangan-Batterien untersucht wurden. Dies wurde jedoch nicht eindeutig dokumentiert. So wären beispielsweise bei Videokameras Werte in der Größenordnung von Digitalkameras zu erwarten. Mit maximal 3,2 % am globalen Einsatz von Kobalt in Elektro- und Elektronikgeräten ergibt sich ein plausibles Ergebnis für die untersuchten 30 Produkte.

Tabelle 28: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Kobalt

Produkt			Metallmenge Kobalt pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
3.1	PC		67,7	108
3.2	Laptop[14]	mit CCFL	5000 - 65000	710 – 9.230
		mit LED		34.790 – 452.270

[14] Angabe mit Batterie

Produkt			Metallmenge Kobalt pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
3.3	Tablet Computer[15]		Keine Angabe	Keine Angabe
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	Keine Angabe
3.5	USB Stick		19,5	230
3.6	Beamer		Keine Angabe	Keine Angabe
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		16,2	48,5
3.8	Schnurloses Heimtelefon		22,6 - 700	127 – 3.920
3.9	Navigationsgerät		30	105
3.10	Handy		720 - 8448	10.512 – 123.341
3.11	Smartphone		6300	48.510
3.12	Digitalkamera		6,8 – 2400	55,7 – 19.680
3.13	Camcorder/Videokamera		19,1 – 7300	15,3 – 5.840
3.14	LCD Monitor		Keine Angabe	Keine Angabe
3.15	LCD Fernseher		Keine Angabe	Keine Angabe
3.16	CRT Gerät	Monitor	180	0
		Fernseher	97,1 – 210	2,9– 6,3
3.17	Fernbedienung		0,9 – 10,6	32,5 – 373
3.18	DVD Spieler		49,3	172
3.19	Tragbare Videospiele[16]		19,8	24,2
3.20	Videospielkonsolen		155	480
3.21	MP3 Player		5 – 10	23 – 46
3.22	Lautsprecher		0,6	1,6
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampen		Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampen		Keine Angabe	Keine Angabe
4.3	Leuchtstoffröhren		Keine Angabe	Keine Angabe
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		300	780
5.2	Wecker, batteriegetrieben		0 – 100	0 – 630

[15] In Tablet Computern sind Batterien zu erwarten. Hierzu konnten jedoch keine Daten gefunden werden.
[16] Angabe vermutlich ohne Batterie

Produkt		Metallmenge Kobalt pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
5.3	Kaffeemaschine	Keine Angabe	
5.4	Rasierapparat	0 – 100	0 – 130
Summe			96,7 – 666 t
Globale Anwendung Kobalt in EEG			20.493 t
Anteil des Kobalts in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an Gesamteinsatz global in EEG			0,5 – 3,2 %

3.7.6 Gallium

Die größten Gesamtmengen pro Produkt ergeben sich für Gallium bei Videospielkonsolen, Handys und Fernbedienungen, Geräten mit hochkomplexen Leiterplatten und/oder optoelektronischen Komponenten. Speziell bei Handys und Smartphones soll in Zukunft zwar mit einem starken Anstieg der Galliumverwendung zu rechnen sein (vgl. USGS 2012), trotzdem liegt der im Projekt ermittelte Wert für Smartphones deutlich unter den Literaturangaben für Handys. Insgesamt liegt der ermittelte Anteil am globalen Gesamteinsatz von Gallium in Elektro- und Elektronikgeräten deutlich niedriger, als bei anderen Metallen.

Tabelle 29: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Gallium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt			Metallmenge Gallium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
3.1	PC		15,5	24,8
3.2	Laptop		4,0	28,4
		mit CCFL	Keine Angabe	
		mit LED	1,6	11,1
3.3	Tablet Computer		**0,4**	0,3
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	
3.5	USB Stick		Keine Angabe	
3.6	Beamer		**0,7**	0,2
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		**0,1**	0,3
3.8	Schnurloses Heimtelefon		4,3	24
3.9	Navigationsgerät		**0,03**	0,1

Produkt			Metallmenge Gallium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
3.10	Handy		4,7	68,1
3.11	Smartphone		**0,1**	0,8
3.12	Digitalkamera		0,7 – 4,3	6 – 35,4
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		2,4 – 5,5	1,9 – 4,4
3.14	LCD Monitor	mit CCFL	Keine Angabe	
		mit LED	3,3	0,6
3.15	LCD Fernseher	mit CCFL	Keine Angabe	
		mit LED	4,9	3,7
3.16	CRT Gerät		Keine Angabe	
3.17	Fernbedienung		0,1 – 1,2	3,2 – 42,2
3.18	DVD Spieler		4	14,1
3.19	Tragbare Videospiele		1,7	2
3.20	Videospielkonsolen		30,9	95,9
3.21	MP3 Player		**0,4**	1,8
3.22	Lautsprecher		Keine Angabe	
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	
4.1	Energiesparlampen		Keine Angabe	
4.2	LED Lampen		0,03 – 0,2	0,1 – 0,8
4.3	Leuchtstoffröhren		Keine Angabe	
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	
5.2	Wecker, batteriegetrieben		Keine Angabe	
5.3	Kaffeemaschine		Keine Angabe	
5.4	Rasierapparat		Keine Angabe	
Summe				0,26 – 0,31 t
Globale Anwendung Gallium in EEG				51 t

Produkt	Metallmenge Gallium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräte (kg)
Anteil des Gallium in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG		0,51 – 0,61 %

3.7.7 Indium

Die mit Abstand größten Gesamtmengen für Indium ergeben sich im Bereich von Flachbildschirmfernsehgeräten und -monitoren. Die große Abweichung zu Laptops und Handys/Smartphones ergibt sich vor allem durch die Größe der Bildschirmfläche, die bei der gleichmäßigen Aufbringung der ITO-Schicht den entscheidenden Faktor darstellt.

Die hohe produktspezifische Indiummasse für schnurlose Heimtelefone ist nicht erklärbar.

Der sehr niedrige Wert am globalen Gesamtverbrauch im EEG-Bereich ist vermutlich so zu erklären, dass ein Großteil des Indiums in der ITO-Produktion nicht im Produkt selbst verbleibt, sondern zu großen Teilen als Produktionsabfall anfällt (vgl. USGS 2012).

Tabelle 30: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Indium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt			Metallmenge Indium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC		Keine Angabe	
3.2	Laptop	mit CCFL	40	5,7
		mit LED		278
3.3	Tablet Computer		**28,6**	22,9
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	
3.5	USB Stick		Keine Angabe	
3.6	Beamer		Keine Angabe	
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		**0 – 0,01**	0 – 0,03
3.8	Schnurloses Heimtelefon		14,9	83,5
3.9	Navigationsgerät		**3,2**	11,2
3.10	Handy		1,773 – 10,244	25,9 - 150
3.11	Smartphone		**2,4**	18,5
3.12	Digitalkamera		1,4 – 4,6	11,8 – 37,8

Produkt			Metallmenge Indium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		4	3,2
3.14	LCD Monitor	mit CCFL	79	191
		mit LED	82	14,1
3.15	LCD Fernseher	mit CCFL	260	1.964
		mit LED		194
3.16	CRT Geräte		Keine Angabe	
3.17	Fernbedienung		0,6 – 1,7	22,7
3.18	DVD Spieler		Keine Angabe	
3.19	Tragbare Videospiele		8,1	9,9
3.20	Videospielkonsolen		Keine Angabe	
3.21	MP3 Player		**0,002 – 0,4**	0,01 – 1,8
3.22	Lautsprecher		Keine Angabe	
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	
4.1	Energiesparlampen		Keine Angabe	
4.2	LED Lampen		0,0002 – 0,03	0,0005 – 0,1
4.3	Leuchtstoffröhren		Keine Angabe	
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	
5.2	Wecker, batteriegetrieben		Keine Angabe	
5.3	Kaffeemaschine		Keine Angabe	
5.4	Rasierapparat		Keine Angabe	
Summe				2,9 – 3,0 t
Globale Anwendung Indium in EEG				420 t
Anteil des Indiums in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG				0,69 – 0,71 %

3.7.8 Zinn

Die Gesamtmengen für Zinn verteilen sich auf diverse Produkte und liegen dort in vielen Fällen im zweistelligen Tonnenbereich. Speziell die (Maximal-)Werte für DVD-Player

und Videospielkonsolen mit jeweils über 60g Zinn pro Gerät erscheinen sehr hoch, insgesamt liegt der Gesamtanteil aber bei vergleichsweise niedrigen 1,1 bis 1,5 % der global in EEG eingesetzten Zinnmenge.

Tabelle 31: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Zinn (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt			Metallmenge Zinn pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC		25.380	40.608
3.2	Laptop		6.357	45.135
3.3	Tablet Computer		**5.273**	4.218
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	Keine Angabe
3.5	USB Stick		71,5	844
3.6	Beamer		**5.899**	1.439
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		6.630	19.891
3.8	Schnurloses Heimtelefon		4.520	25.312
3.9	Navigationsgerät		6.750	23.625
3.10	Handy		1.167	17.032
3.11	Smartphone		**648**	4.990
3.12	Digitalkamera		572 – 1.891	4.688 – 15.504
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		710 – 4.035	568 – 3.228
3.14	LCD Monitor[17]	mit CCFL	530	1.282
		mit LED	530	90,9
3.15	LCD Fernseher	mit CCFL	18.300 – 26.576	138.220 – 200.729
		mit LED	18.300 – 26.576	13.670 – 19.852
3.16	CRT Gerät	Monitor	810	0
		Fernseher	13.000 – 48.546	390 – 1.456
3.17	Fernbedienung		243 – 502	8.574 – 17.732
3.18	DVD Spieler		9.856 – 63.114	34.496 – 220.899

[17] Die extrem hohen Differenzen im Zinngehalt zwischen den verschiedenen Monitortypen sind in dieser Größenordnung eigentlich kaum nachvollziehbar und zumindest nicht auf unterschiedliche Komponenten zurückzuführen.

Produkt		Metallmenge Zinn pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.19	Tragbare Videospiele	12.210	14.896
3.20	Videospielkonsolen	66.521	206.215
3.21	MP3 Player	825 – 1.500	3.795 – 6.900
3.22	Lautsprecher	4.396	11.429
3.23	Kopfhörer	Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampen	Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampen	300	1.050
4.3	Leuchtstoffröhren	110	7.480
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben	Keine Angabe	Keine Angabe
5.2	Wecker, batteriegetrieben	Keine Angabe	Keine Angabe
5.3	Kaffeemaschine	Keine Angabe	Keine Angabe
5.4	Rasierapparat	Keine Angabe	Keine Angabe
Summe			629,9 – 911,7 t
Globale Anwendung Zinn in EEG			59.800 t
Anteil des Zinns in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG			1,1 – 1,5 %

3.7.9 Neodym

Die größten Gesamtmengen für Neodym ergeben sich zum einen bei Geräten mit Festplatten (PCs, Laptops, externe Festplatten), zum anderen im Bereich Akustik, da Neodym in dort benötigten Magneten enthalten ist, siehe Metall-Komponenten-Matrix. Neodym in Batterien scheint dagegen mengenmäßig nur eine nachgeordnete Rolle zu spielen. Der im Projekt ermittelte Wert für Tablet Computer liegt deutlich unterhalb des Wertes für Notebooks, was aufgrund der verwendeten solid-state-Festplatten plausibel ist. Der Gesamtanteil des deutschen Neodymeinsatzes von 3,9 % bis 6,1 % des globalen Seltenerdeinsatzes in EEG erscheint plausibel.

Tabelle 32: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Neodym (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt		Metallmenge Neodym pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC	6.830	10.928

Produkt			Metallmenge Neodym pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.2	Laptop	mit CCFL	2.100	298
		mit LED		14.612
3.3	Tablet Computer		**347**	278
3.4	Externe Festplatten		1.044 – 11.500	3.236 – 35.650
3.5	USB Stick		10,4	123
3.6	Beamer		Keine Angabe	Keine Angabe
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		Keine Angabe	Keine Angabe
3.8	Schnurloses Heimtelefon		167	937
3.9	Navigationsgerät		**1,0**	3,5
3.10	Handy		46 – 118	672 – 1.726
3.11	Smartphone		**120**	924
3.12	Digitalkamera		16,6 – 170	136 – 1.393
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		20,8	16,6
3.14	LCD Monitor		Keine Angabe	Keine Angabe
3.15	LCD Fernseher		Keine Angabe	Keine Angabe
3.16	CRT Geräte		Keine Angabe	Keine Angabe
3.17	Fernbedienung		0,2 – 7,5	6,5 – 266
3.18	DVD Spieler		314	1.099
3.19	Tragbare Videospiele		42,9	52,3
3.20	Videospielkonsolen		1.238	3.837
3.21	MP3 Player		Keine Angabe	Keine Angabe
3.22	Lautsprecher		5.200	13.520
3.23	Kopfhörer		1.370	11.097
4.1	Energiesparlampe		Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampe		Keine Angabe	Keine Angabe
4.3	Leuchtstoffröhren		Keine Angabe	Keine Angabe
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.2	Wecker, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.3	Kaffeemaschine		Keine Angabe	Keine Angabe

Produkt		Metallmenge Neodym pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
5.4	Rasierapparat	Keine Angabe	Keine Angabe
Summe			61,8 – 96,8 t
Globale Anwendung Seltene Erden in EEG			1.596 t
Anteil des Neodyms in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung Seltener Erden in EEG			3,9 – 6,1 %

3.7.10 Yttrium

Für Yttrium ergeben sich die größten Gesamtmengen für den Bereich der LCD-Fernseher mit CCFL sowie für Gasentladungslampen. Auch die höchsten gerätespezifischen Werte finden sich erwartungsgemäß bei Fernsehern sowie den Energiesparlampen. Der Gesamtanteil von Yttrium in Geräten die in Deutschland in Verkehr gebracht wurden am globalen Verbrauch von seltenen Erden insgesamt in EEG ist mit 0,43 % bis 1,16 % etwas niedriger als bei anderen RePro-Metallen, dies ist aufgrund der Bezugsgröße aller Seltenen Erden jedoch auch zu erwarten.

Tabelle 33: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Yttrium (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt			Metallmenge Yttrium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC		Keine Angabe	
3.2	Laptop	mit CCFL	1,8	0,3
		mit LED	1,6	11,1
3.3	Tablet Computer		**1,9**	1,5
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	
3.5	USB Stick		Keine Angabe	
3.6	Beamer[18]		**0**	0
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		**0 – 0,01**	0 – 0,03
3.8	Schnurloses Heimtelefon		2,9	16,5
3.9	Navigationsgerät		**0,04**	0,14

[18] Unterhalb der Nachweisgrenze

Produkt			Metallmenge Yttrium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.10	Handy		Keine Angabe	Keine Angabe
3.11	Smartphone		**0 – 0,01**	0 – 0,1
3.12	Digitalkamera		1,9 – 36,1	15,4 – 296
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		88	70,4
3.14	LCD Monitor	mit CCFL	16	38,7
		mit LED	3,2	0,5
3.15	LCD Fernseher	mit CCFL	110	831
		mit LED	4,8	3,6
3.16	CRT Geräte[19]		Keine Angabe	Keine Angabe
3.17	Fernbedienung		0,1 – 0,2	3,2 – 6,5
3.18	DVD Spieler		Keine Angabe	
3.19	Tragbare Videospiele		3,1	3,8
3.20	Videospielkonsolen		24,8	76,7
3.21	MP3 Player		**0 – 0,004**	0 – 0,02
3.22	Lautsprecher		Keine Angabe	Keine Angabe
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampe		27 – 135	2.830 – 14.152
4.2	LED Lampe		0,03 – 0,5	0,1 – 1,8
4.3	Leuchtstoffröhren		43,8	2.979
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.2	Wecker, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe
5.3	Kaffeemaschine		Keine Angabe	Keine Angabe
5.4	Rasierapparat		Keine Angabe	Keine Angabe
Summe				6,88 t – 18,5 t
Globale Anwendung Seltene Erden in EEG*				1.596 t

[19] In CRT-Geräten kann eine relativ hohe Menge an Y2O3 pro Gerät vermutet werden, produktspezifische Daten konnten hier jedoch nicht recherchiert werden. Durch den geringen Geräteabsatz spielen die CRT-Geräte insgesamt nur eine stark untergeordnete Rolle.

Produkt	Metallmenge Yttrium pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
Anteil des Yttriums in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung Seltener Erden in EEG		0,43 % – 1,16 %

* Zum Untersuchungszeitraum lagen Werte zu den globalen Anwendungen von Yttrium nicht vor. Daher werden hier Seltene Erden als Bezugsgröße genannt.

3.7.11 Weitere Metalle der Seltenen Erden

Zusätzlich zu den als Stellvertreter ausgesuchten Elementen Yttrium und Neodym erfolgt in Tabelle 34 und Tabelle 35 für weitere Seltene Erden eine Abschätzung für die Einsatzmengen. Dafür wurden auf Basis von Angaben zur durchschnittlichen Zusammensetzung von Magneten und Leuchtstoffen Umrechnungsfaktoren errechnet und diese auf die Angaben für Yttrium und Neodym angewendet. Die Daten ergeben dementsprechend nur eine grobe Einschätzung. Der ermittelte Gesamtanteil liegt bei 0,6 – 1,5 % für Leuchtstoffe und 4,2 – 6,7 % für Magnetstoffe.

Tabelle 34: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Seltene Erden in Neodym-Eisen-Bor-Magneten (Mengenanteile nach Oakdene Hollins (2010))

Metall	Typische Mengenanteile der Seltenen Erden (Massenprozent)	Umrechnungsfaktor von Neodym auf weitere Elemente der Seltenen Erden	Gesamtmenge der Metalle in den betrachteten, in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
Neodym	29	1	61.776 – 96.760
Dysprosium	3	0,10	6.391 – 10.010
Summe			68 – 107 t
Globale Anwendung Seltene Erden in EEG			1.596 t
Anteil der Seltenen Erden in den 30 Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG			4,2 – 6,7 %

Tabelle 35: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall – Seltene Erden in Leuchtstoffen (Mengenanteile der USGS 2011) [20]

	Typische Mengenanteile der Seltenerdoxide (Massenprozent)	Umrechnungsfaktor von Yttrium auf weitere Elemente der Seltenen Erden	Gesamtmenge der Metalle in den betrachteten, in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
Yttriumoxid	69	1	6.882 – 18.490
Ceroxid	11	0,11	738 – 1.982
Lanthanoxid	8,5	0,08	569 – 1.539
Europium	4,9	0,05	332 – 893
Terbiumoxid	4,6	0,05	307 – 825
Gadoliniumoxid	1,8	0,02	123 – 330
Summe			9,0 - 24t
Globale Anwendung Seltene Erden in EEG			1.596 t
Anteil der Seltenen Erden in den 30 Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG			0,6 – 1,5 %

Quelle: Eigene Darstellung; Oakdene Hollins (2010), USGS (2012)

3.7.12 Tantal

Die mit Abstand höchsten Gesamtmengen für Tantal ergeben sich für Laptops, weil hier ein besonders hoher Anteil tantalhaltiger Kondensatoren verwendet wird. Diese Ergebnisse sind in der gleichen Größenordnung wie die in eigenen Untersuchungen ermittelten Werten für Ta in Laptops (vgl. Kapitel 6.6.3). Insgesamt liegt die Gesamtmenge mit 2,0 – 3,2 % am Gesamtverbrauch im EEG-Bereich in einem plausiblen Bereich. Hohe Werte ergeben sich auch im Bereich von Kameras, in denen anscheinend zunehmend auf hochwertige Kondensatoren gesetzt wird.

Tabelle 36: Darstellung der Gesamtmengen pro Metall - Tantal (Ergebnisse eigener Analysen fett gedruckt)

Produkt		Metallmenge Tantal pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.1	PC	9,9	15,8

[20] Einschränkend muss erwähnt werden, dass sich die Werte zur stofflichen Zusammensetzung auf Oxide beziehen. Angesicht der angegebenen Spannbreiten können die dadurch entstehenden Ungenauigkeiten als vernachlässigbar betrachtet werden.

Produkt			Metallmenge Tantal pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
3.2	Laptop		2.304	16.358
		mit CCFL	1.700	241
		mit LED		11.829
3,3	Tablet Computer		**23,7**	19,0
3.4	Externe Festplatten		Keine Angabe	Keine Angabe
3.5	USB Stick		Keine Angabe	Keine Angabe
3.6	Beamer		**0 – 25,6**	0 – 6,2
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner		**0 – 15,9**	0 – 47,7
3.8	Schnurloses Heimtelefon		0,5	2,5
3.9	Navigationsgerät		**15,9**	55,7
3.10	Handy		86,7	1.265
3.11	Smartphone		**0 – 2,4**	0 – 18,5
3.12	Digitalkamera		0,6 – 383	4,7 – 3.141
3.13	Camcorder/Videokamera (digital)		60 – 850	48 – 680
3.14	LCD Monitor		Keine Angabe	Keine Angabe
3.15	LCD Fernseher		Keine Angabe	Keine Angabe
3.16	CRT Geräte		Keine Angabe	
3.17	Fernbedienung		0,1 – 6,5	3,2 – 231
3.18	DVD Spieler		34,5	121
3.19	Tragbare Videospiele		0,2	0,2
3.20	Videospielkonsolen		26,3	81,5
3.21	MP3 Player		**0 – 0,8**	0 – 3,7
3.22	Lautsprecher		Keine Angabe	Keine Angabe
3.23	Kopfhörer		Keine Angabe	Keine Angabe
4.1	Energiesparlampe		Keine Angabe	Keine Angabe
4.2	LED Lampe		Keine Angabe	Keine Angabe
4.3	Leuchtstoffröhren		Keine Angabe	Keine Angabe
5.1	Bohrmaschine, batteriegetrieben		Keine Angabe	Keine Angabe

Produkt		Metallmenge Tantal pro Produkt (mg)	Gesamtmenge des Metalls in allen in Deutschland im Jahr 2010 in Verkehr gebrachten Geräten (kg)
5.2	Wecker, batteriegetrieben	Keine Angabe	Keine Angabe
5.3	Kaffeemaschine	Keine Angabe	Keine Angabe
5.4	Rasierapparat	Keine Angabe	Keine Angabe
Summe			13,7 – 22,0 t
Globale Anwendung Tantal in EEG			696 t
Anteil des Tantals in den tabellierten Geräten (2010 in D in Verkehr) an globaler Anwendung in EEG			2,0 – 3,2 %

3.7.13 Dynamiken

Mit dem Bezugsjahr 2010 und der Verwendung der unterschiedlichen Angaben zu Metallgehalten wurde eine statische Momentaufnahme als Basis für die weiteren Untersuchungsschritte im Rahmen des Projekts beschrieben. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich der Markt für Elektronikprodukte in unterschiedlichen Hinsichten sehr dynamisch entwickelt.

Veränderungen des Metallgehalts ergeben sich aus Veränderungen der eingesetzten Technologien. Im Bereich der Bildschirme ist vorhersehbar, dass CRT-Geräte in Zukunft vollständig vom Markt verschwinden werden. Die LED-Technik als Hintergrundbeleuchtung von LCD-Geräten gewinnt hingegen an Bedeutung; bei den Laptops hat sie die CCFL-Technik bereits fast vollständig ersetzt. In Zukunft wird der Anteil an Indium und Gallium in Bildschirmen steigen. Selbstleuchtende OLED-Technologien gelten als mögliche Alternative zu LCD-Bildschirmen. Sie sind energieeffizienter, erreichen schneller den Betriebszustand, sind deutlich leichter und biegsamer (vgl. Angerer et al. 2009). Das Abfallpotenzial eilt jedoch nach, so dass in der Abfallbehandlung älteren Technologien zu entsorgen sind.

Mobiltelefone werden zunehmend durch Smartphones ersetzt. Damit geht ein steigender Bedarf an Gallium einher (USGS 2012)[21]. Angerer et al. (2009) schätzen, dass sich die Galliumnachfrage für diesen Bereich bis 2030 um den Faktor 2,5 erhöhen wird und damit die gesamte heutige Minenproduktion beanspruchen würde. Durch den Ersatz von Festplatten in PC und Laptops durch SSD-Festplatten ist zudem mit einem Rückgang der benötigten Neodymmenge in diesem Bereich zu rechnen.

Steigende Rohstoffpreise setzen jedoch auch Anreize für die Hersteller von Elektronikprodukten, den Einsatz bestimmter Elemente zu reduzieren. So wurde die Einsatzmenge von Palladium pro MLCC-Einheit reduziert. Durch effiziente und effektive Beschichtungstechnologien kann die Dicke metallischer Schichten auf wenige nm reduziert werden (Dill 2010)

[21] Die in Tabelle 29 dargestellten Werte zeigen eine größere Menge für klassische Mobiltelefone als für Smartphones. Dies könnte beispielsweise durch die unterschiedlichen Versuchsparameter bei der Messung begründet sein.

Angesichts der extrem hohen Innovationstätigkeit im Bereich der Elektronikprodukte ist davon auszugehen, dass der Technologiewandel fortschreiten wird und sich neue Marktsegmente entwickeln werden.

Veränderungen ergeben sich auch durch die Integration von Funktionalitäten in komplexere Produkte. Auch hier sind Smartphones zu erwähnen, die u. a. zu einem deutlichen Rückgang der Nachfrage nach Taschenrechnern geführt haben (vgl. ZVEI 2012). Ähnliche Entwicklungen sind für die Bereiche Digitalfotografie und tragbare Spielekonsolen zu erwarten.

3.7.14 Zusammenführung

Die recherchierten und empirisch gewonnenen Daten zu Metallgehalten und zu den Produktmengen wurden in einem anschließenden Arbeitsschritt zusammengeführt. Das dabei gewählte Vorgehen orientiert sich an Oguchi et al. 2011, die eine solche Darstellung auf Basis japanischer Marktdaten und für eine andere Produktauswahl entwickelt haben.

Die metallspezifischen Darstellungen im Anhang 10.1.2 zeigen auf der y-Achse den prozentualen Anteil des Metalls am Gewicht der verschiedenen Geräte, auf der x-Achse sind die absoluten Mengen der verkauften Geräte als Gewicht aufgetragen (angesichts der großen Spannbreiten werden beide Achsen logarithmiert dargestellt. Geräte, die das jeweilige Metall nicht enthalten („0 mg“ bzw. „keine Angabe“ in. Tabelle 25 bis Tabelle 36) sind dementsprechend nicht in den Abbildungen dargestellt).

Die Darstellung ermöglicht es, Produktgruppen zu identifizieren, die aufgrund ihrer absoluten Menge und des Gehalts eines bestimmten Metalls besonders projektrelevant sind. Die relevantesten Produkte sind in den Abbildungen oben rechts zu finden (hoher Gehalt, große Gesamtmenge). Die Darstellung bezieht sich ausschließlich auf komplette Produkte und ihr Gesamtgewicht.

Abbildung 184 zeigt den prozentualen Anteil von **Gold** am Gewicht der verschiedenen Produkte. Die schwarzen Balken kennzeichnen die Spannbreite zwischen den verschiedenen recherchierten Minimal- und Maximalwerten pro Produkt (aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur dort Spannbreiten angegeben, wo sich signifikante Unterschiede zwischen ergaben, hier wurde ein Faktor 3 als Grenzwert genommen, andernfalls wird der minimale Wert angegeben). Besonders große Spannbreiten können somit auch als Hinweis auf eine nach wie vor unsichere Datenlage interpretiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem Kleingeräte, wie MP3 Player, Handys aber auch Digitalkameras vergleichsweise hohe Goldgehalte aufweisen[22].

Bei **Silber** verdeutlicht Abbildung 185, dass neben MP3 Playern und Navigationsgeräten vor allem Kommunikationsgeräte (Handy, Smartphone, schnurloses Heimtelefon) vergleichsweise hohe Gewichtsanteile aufweisen. Hier sind auch die DVD-Player zu nennen, die jedoch eine extreme Spannbreite in den verschiedenen Literaturangaben aufweisen.

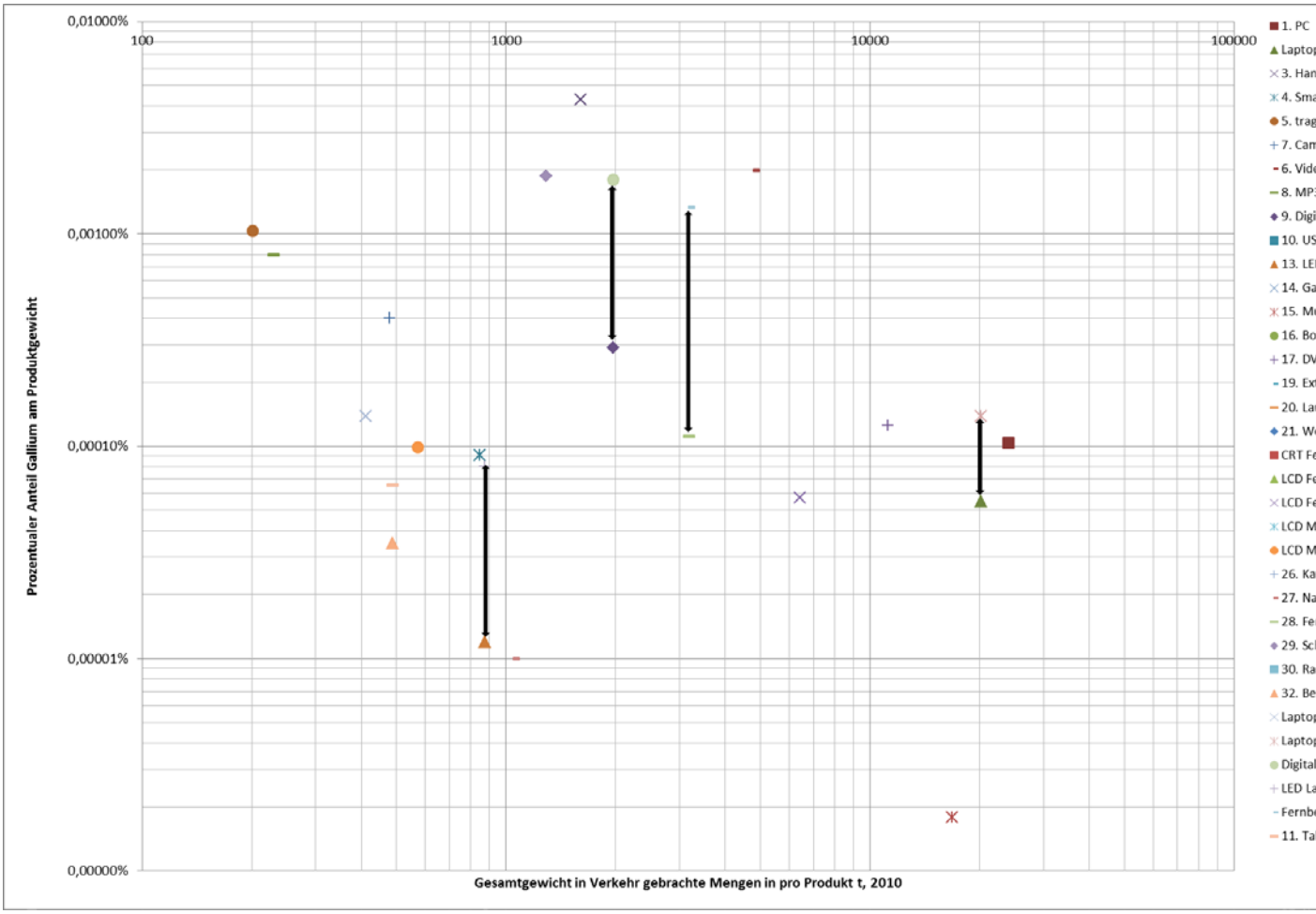
[22] Für USB-Sticks ergeben die Angaben einen Goldgehalt von bis zu 1,48 %, hierbei sei aber auf die beschriebenen Datenuntersicherheiten verwiesen.

Ein sehr ähnliches Bild zeigt Abbildung 186 für **Palladium**, hier kommen jedoch noch Camcorder und Digitalkameras hinzu, die nahezu ähnliche hohe Gewichtsanteile aufweisen.

Die in Abbildung 187 dargestellte Verteilung bei **Kobalt** zeigt, dass hier vor allem komplexe transportable Elektronikprodukte und kabellose Werkzeuge hohe Gewichtsanteile aufweisen, insbesondere Smartphones und Handys. Hier ist zu berücksichtigen, dass sich der größte Anteil des Kobalts in Batterien befindet (Relevanz für Erfassung und Separation).

Für Gallium ist in Abbildung 188 erkennbar, dass hier Handys den höchsten Gewichtsanteil aufweisen, allerdings nur knapp gefolgt von einer Reihe verschiedener Produkte wie Digitalkameras oder Fernbedienungen.

Abbildung 188: Galliumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 189Abbildung 189 zeigt, dass für **Indium** die höchsten Gewichtsanteile bei schnurlosen Heimtelefonen erreicht werden sollen, was sich wie beschrieben nicht wirklich nachvollziehen lässt. Dahinter weisen interessanterweise Flachbildschirme trotz ihres deutlich höheren Gewichts ähnliche Anteile auf wie Handys, Tablet Computer oder tragbare Videospielgeräte.

Die Darstellung für **Zinn** (Abbildung 190) zeigt, dass hier doch deutlich höhere Konzentrationen pro Produkt erreicht werden als für alle anderen betrachteten Rohstoffe, für eine ganze Reihe von Produkten mit offenbar vielen Lötungen werden Werte über 1 % erreicht, vor allem im Bereich der Videospielgeräte.

Für die Gewichtsanteile von **Neodym** zeigt Abbildung 191, dass hier Akustikanwendungen (Kopfhörer, Lautsprecher) und externe Festplatten sehr hohe Neodymanteile aufweisen.

Bei **Yttrium** weisen Monitore und Fernseher mit CCFL-Technologien die höchsten Gewichtsanteile auf, zusätzlich sind hier auch Energiesparlampen zu nennen.

Für **Tantal** zeigt Abbildung 192, dass die absoluten höchsten Gewichtsanteile mit bis zu 0,16 % bei Digitalkameras und Camcordern erreicht werden, allerdings weisen beide Werte auch extrem hohe Spannbreiten auf. Daneben sind vor allem Laptops und Handys als Produkte mit einem hohen spezifischen Tantalgehalt zu nennen.

Angesichts der teilweise sehr unterschiedlichen Relevanz einzelner Produkte für den Einsatz der verschiedenen betrachteten Metalle soll abschließend eine aggregierte Gesamtbetrachtung vorgenommen werden. Dazu wird auf den Indikator KEA zurückgegriffen, der es als ökologischer Summenparameter ermöglicht, vom Metallgehalt der Produkte auf ihre Umweltrelevanz zu schließen.

Tabelle 37zeigt die Relevanz untersuchter Produkte gemessen am KEA für die ausgewählten Metalle, wenn eine Gesamtbetrachtung für alle in Deutschland jährlich in Verkehr gebrachten Mengen vorgenommen wird. Danach ergeben sich die höchsten KEA-Werte für Laptops (695 TJ), Handys, Videospielkonsolen und Flachbildfernseher mit CCFL-Technologien. Interessanterweise sind auch in der Gesamtbetrachtung DVD-Spieler als auch USB Sticks in der TopTen vertreten. Durch die Verwendung des Maximalwertes werden hier Ausreißer wie z. B. bei Gold in DVD-Spielern betont. Die hohe Anzahl der in Verkehrgebrachten USB Sticks (11,8 Mio. Stück im Jahr 2010) sowie die geringe Gerätemasse verstärken den Effekt möglicher Messungenauigkeiten in dieser Darstellung. Die folgende Tabelle zeigt die Produkte mit den höchsten Gesamt-KEA-Werten.

Tabelle 37: Gesamt KEA-Werte pro Produktart (beispielhafte Auswahl)

Lfd. Nr.	Produkt	KEA in TJ/a
3.2b	Laptop mit LED	695
3.18	DVD Spieler	672[23]
3.5	USB Stick	593
3.15a	LCD TV mit CCFL	474
3.20	Videospielkonsolen	385
3.10	Handy	380
3.12	Digitalkamera	379
3.1	PC	225
3.14a	LCD Monitor mit CCFL	143

Quelle: Eigene Berechnungen. Jeweils bezogen auf alle im Jahr 2010 in Deutschland abgesetzten Geräte der Produktart, gemessen als Summe der KEA-Werte der 10 ausgewählten ressourcenrelevanten Metalle (ohne z. B. KEA der Fertigungs- und Montageprozesse). Bei Spannweiten bezüglich der Metallgehalte wurde hier der Maximalwert gewählt.

[23] Der unerwartet hohe KEA-Wert für DVD-Spieler kommt durch den außergewöhnlich hohen Maximalwert für den Goldgehalt von DVD-Spielern (vgl. Tabelle 25) zustande. Hier handelt es jedoch wahrscheinlich um einen Ausreißer.

3.8 Potenzielle Altgerätemengen

Die potenziellen Abfallmengen (Abfallpotenzial) in Deutschland für die 30 RePro-Geräte wurden für die Jahre 2012 (Jahr der Sortieranalyse) und 2020 bestimmt (siehe Tabelle 39).

Für die Bestimmung des Abfallpotenzials wurde ein Vorgehen in Anlehnung an die Methode „Einfache Verzögerung“ angewandt (Chancerel 2010, Wang 2013). Das Abfallpotenzial im Jahr X wird hierbei bestimmt, indem die durchschnittliche Verweildauer des jeweiligen Produktes bestimmt wird und die in Verkehr gebrachte Menge (iVgM) im Jahr (X-durchschnittliche Verweildauer) herangezogen wird.

Informationen zur Lebens-, Nutzungs- und Verweildauer[24] der Geräte wurden über Literaturrecherchen erhoben, wobei in den Quellen nicht immer gleichermaßen zwischen technischer Lebensdauer, Nutzungsdauer und Verweilzeit unterschieden wurde. Dort, wo die Angaben in der Literatur sich nicht explizit auf die Verweildauer bezogen, wurde zur Ermittlung der durchschnittlichen Verweildauer die Wahrscheinlichkeit der Lagerung nach Ende der Nutzungsdauer einbezogen. Als Einflussfaktoren auf die Zwischenlagerung vor der Entsorgung wird dabei unter anderem die Größe des Gerätes, die Notwendigkeit der Verfügbarkeit bzw. die Verzichtbarkeit und/oder die Verfügbarkeit von Ersatzgeräten, der Preis und die Frage, ob es sich um eine neue oder alte Technologie handelt, angesetzt. Die Rechercheergebnisse für die RePro-Produkte finden sich in Tabelle 38

Tabelle 38: Rechercheergebnisse zur Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit der ausgewählten Produkte

RePro-Nr.	Geräte	Kommentar
3.1	PC	Der relativ hohe Preis von PC führt zu einer erhöhten Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit. Die Gerätegröße und die Tatsache, dass es sich inzwischen um eine etablierte Technologie handelt, führen zur Einstufung als einem nicht signifikanten Zwischenlagerungsumfang.
3.2	Laptops, Notebooks	Die Nutzungsdauer von Laptops und Notebooks sinkt u. A. durch sinkende Preise und die Übernahme der Funktionen durch Smartphones und Tablets. Aufgrund des weiterhin vergleichsweise hohen Preises und der geringen Größe wird eine Verweildauer entsprechend der höheren Werte in den Literaturquellen angenommen.
3.3	Tablets	Angaben über die Nutzungsdauer von Tablets sind aufgrund der vergleichsweise jungen Technologie und einem dynamischen Markt kaum verfügbar. Prakash und Gröger (2017) nennen als Verweildauer 5 Jahre.

[24] Siehe Glossar am Anfang des Berichtes.

Re-Pro-Nr.	Geräte	Kommentar
3.4	Festplatte extern	Zwar spricht die Größe der externen Festplatten für eine erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit. Sinkende Preise, die Tatsache, dass es sich um etablierte Technologien handelt, und die Befürchtungen von Datenverlusten bei zu langer Nutzungsdauer führt nicht zur Erwartung signifikanter Zwischenlagerungswahrscheinlichkeiten.
3.5	USB Sticks	Aufgrund des geringen Preises und der hohen Verlustwahrscheinlichkeit aufgrund der geringen Größe ist die Verweilzeit gering. Da die geringe Größe aber auch eine einfache Lagerung ermöglicht, wird eine im Vergleich zur Nutzungsdauer leicht verlängerte Verweilzeit von 3 Jahren angesetzt.
3.6	Beamer	Der vergleichsweise hohe Preis von Beamern führt zu einer erhöhten Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit. Die technologische Entwicklung bei Lichtleistung, Geräuschentwicklung, Stromverbrauch und Größe lässt jedoch eine nicht signifikant erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit erwarten.
3.7	Multifunktionsdrucker	Multifunktionsdrucker werden im Sinne der o.g. Kriterien als wichtige Geräte eingestuft, wodurch eine Zwischenlagerung wahrscheinlicher werden kann. Die Gerätegröße führt allerdings zu einer nicht signifikanten Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit
3.8	Telefone	Telefone werden als notwendige Geräte eingestuft. Allerdings erfolgt ein Technologiewandel (IP-Telefonie), und Festnetztelefone werden durch Mobiltelefone abgelöst. Daher wird eine nicht signifikante Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit angesetzt.
3.9	Navigationsgeräte	Navigationsgeräte werden als wichtige Geräte im Alltag eingestuft, ihre Funktionalität wird jedoch zunehmend potenziell auch durch Smartphones bereitgestellt. Daher ist wird die Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit als zukünftig nicht signifikant eingestuft.
3.10	Handy	Laut bitkom (2014) werden zunehmend Mobiltelefone zwischengelagert. Die Zahl stieg entsprechend den Angaben von bitkom von 70 Millionen in 2010 auf über 100 Millionen in 2013.
3.11	Smartphones	

Re-Pro-Nr.	Geräte	Kommentar
3.13	Kameras	Der schnelle technologische Wandel, der Preisverfall und die Verbesserung der Kamerafunktionen von Smartphones lassen keine wesentlich erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit erwarten.
3.14	Monitor flach	Größe, schneller technologischer Wandel sowie die sinkenden Preise bei vergleichbaren Geräten lassen keine wesentlich erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit erwarten
3.15	Fernsehgeräte flach	
3.16	CRT-Fernsehgeräte	Der derzeitige Technologiewandel zu Flachbildschirmen führt zu einer verkürzten Nutzungsdauer. Die Größe der Geräte lässt eine erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit gering erscheinen. Eine verkürzte Verweildauer wird auch durch die Ergebnisse der Sortieranalyse im Projekt RePro bestätigt.
3.16	CRT-Monitor	
3.17	Fernbedienung	Analog zu Fernsehern und DVD-Spielern; Angesichts des derzeitigen Technologiewandels (zu Flachbildschirmen bzw. Kombigeräten) ist die Nutzungsdauer für die derzeitige Situation ggf. zu lang angesetzt. Eine erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit ist durch die Verknüpfung der Technologie mit den Fernsehern und DVD-Spielern nicht gegeben.
3.18	DVD/CD-Player/ Videorekorder	Aufgrund des derzeit stattfindenden Technologiewandels zu Kombigeräten aus IT und UE wird von einer verkürzten Nutzungsdauer ausgegangen. Wg. der Möglichkeit zur Nutzung vorhandener Medien (CD, DVD, Video) wird von einem Mittelwert der in der Literatur angegebenen Werte in RePro ausgegangen.
3.19	Videospiel tragbar	Durch schnelle Produktzyklen ist die Nutzungsdauer von Videospielkonsolen deutlich geringer, als die technische Lebensdauer. Eine signifikant erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit wird nicht erwartet, da neue Spiele und alte Konsolen nicht kompatibel sind.
3.20	Videospielkonsolen	
3.21	MP3 Player	Eine signifikant hohe Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit wird nicht erwartet. Zwar ist die Lagerung der kleinen Geräte einfach, aber die Funktionalität wird durch Smartphones übernommen

Re-Pro-Nr.	Geräte	Kommentar
3.22	Lautsprecherboxen	Aufgrund der derzeit entsorgten Geräte (Ergebnisse der Sortieranalyse) werden hier große Lautsprecherboxen berücksichtigt. Die Größe und der Technologiewandel (Aktivboxen, Magnetwerkstoffe) lassen eine nicht signifikant erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit erwarten.
3.23	Kopfhörer	Eine erhöhte Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit nach Ende der Nutzungsdauer wird bei Kopfhörern nicht erwartet.
4.2	LED Lampen	Aufgrund der stark designorientierten Entscheidungen über Nutzungen bzw. Ende der Nutzungsdauern und den schnellen Technologiewandel wird nicht von einer überdurchschnittlichen Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit ausgegangen.
5.1	Bohrmaschine batteriebetrieben	Da die Akkulebensdauer ein wesentlicher Faktor der Nutzungsdauer der Geräte ist wird die Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit nach Ende der Nutzungsdauer (also auch nach einem ggf. möglichen Akkutausch) als durchschnittlich eingestuft.
5.2	Wecker, batteriebetrieben	Bei diesen Geräten wird von einer durchschnittlichen Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit ausgegangen.
5.3	Kaffeemaschinen	Aufgrund des vergleichsweise geringen Preises von mengenrelevanten Kaffeemaschinentypen wird von keiner erhöhten Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit ausgegangen
5.4	Rasierapparate	Bei diesen Geräten wird von einer erhöhten Zwischenlagerungswahrscheinlichkeit ausgegangen, da die Geräte als Unverzichtbar eingestuft werden und ein Austausch oftmals nur wg. schlechter Rasierergebnisse aber nicht wg. eines Totalausfalls des Gerätes erfolgt.

Wesentliche Quellen waren Prakash et al. (2017), Chancerel (2010), Streicher-Porte (2014), Wang (2013), Gartner in vdi (2013), Fraunhofer IZM (2007a & b), UNU (2007), Schluep et al. (2009), Robinson (2009), Manhardt (2012). Anmerkungen:

- CRT-Monitore: Aufgrund der Nutzung von CRT-Monitoren in einigen grafischen Anwendungsbereichen (Farbechtheit im niedrigpreisigen Bereich) wurde noch von geringen Absatzzahlen bis zum Jahr 2009 ausgegangen, obwohl CRT Monitore im CEMIX-Index nicht mehr ausgewiesen wurden.
- Fernbedienungen: Die Berechnung erfolgte auf der Grundlage der Angaben von Fernbedienungen pro Haushalt nach bitkom (2011) sowie der Angaben von DESTATIS zur Anzahl der Haushalte in Deutschland und der durchschnittlichen Nutzungsdauern von Fernbedienungen eine Bestimmung der Gesamtzahlen.

- Tragbare Videospiele: Relevante Marktanteile in diesem Bereich haben lediglich vier verschiedene Konsolen: Nintendo DS, Nintendo 3DS, Playstation Portable, Playstation Vita (T3n 2013). Für Nintendo DS und Playstation Portable liegen Absatzzahlen in Deutschland für die Jahre 2005 bis 2012 vor. Nintendo 3DS und Playstation Vita sind erst seit 2012 auf dem Markt. Für alle Konsolen liegen weltweite Absatzzahlen für die Jahre 2008 bis 2012 vor. Anhand dieser Zahlen wurde der Anteil Deutschlands am Weltmarkt für die Konsolen Nintendo DS und Playstation Portable berechnet (5,6 % und 2 %). Diese Anteile wurden auch für die jeweils neueren Konsolen der Hersteller bei der Berechnung der Absatzzahlen in Deutschland angenommen.
- Kaffeemaschinen: Die veröffentlichten Zahlen beziehen sich ausschließlich auf Filterkaffeemaschinen und liegen als Umsatzzahlen für die Jahre 2007 bis 2010 vor (ZVEI 2010, 2011). Zur Ermittlung der Mengen aus den Umsatzzahlen wurden als Durchschnittspreis für eine Filterkaffeemaschine auf der Basis einer Online-Recherche 50 € angenommen.
- Rasierapparate: Hier liegen ebenfalls Umsatzzahlen für die Jahre 2007 bis 2010 für die Kategorien „Herrenrasierer“ und „Bart- und Haarschneider“ vor (ZVEI 2010, 2011). Als Durchschnittspreis pro Rasierer wurden auf der Basis einer Online-Recherche 50 € angenommen.
- LED-Lampen: Laut einer Studie von Frost & Sullivan lag der Umsatz mit LED-Lampen 2009 in Deutschland bei 16.500.000 Millionen € (GTAI 2010). Ausgehend von einer Recherche im Webarchiv von Amazon wird ein durchschnittlicher Preis von 10 € pro LED-Leuchtmittel angenommen (Wayback Machine 2013). Damit wird von LED-Absatzzahlen von 1.650.000 im Jahr 2009 in Deutschland ausgegangen. Diese Schätzung ist gegebenenfalls zu hoch angesetzt, wenn sich die Umsatzzahlen nicht nur auf die Leuchtmittel, sondern (ganz oder teilweise) auch auf komplette Leuchten beziehen. Weiter zurückliegende Marktzahlen konnten nicht identifiziert werden. Eine Trendrückrechnung hat ebenfalls keine sinnvollen Zahlen ergeben. Aus diesem Grund wird basierend auf Expertenmeinung für das hier relevante Jahr 2007 von 100.000 iVgM LED Lampen ausgegangen. Dies ist vermutlich immer noch ein zu hoch angesetzter Wert, da dieses Beleuchtungsmittel erst 2007 (Spengler 2013 per.com.) relevant auf den Markt gekommen sind.
- Bohrmaschinen: Aufgrund fehlender Daten wurden verfügbare Werte des Jahres 2009 interpoliert.
- Wecker: Aufbauend auf den Angaben der PRODCOM-Datenbank und den Angaben für die Entwicklung der Einfuhrmengen in GENESIS-Online (DESTATIS 2015) wurde ein gleichbleibender Verlauf der iVgM angesetzt.

Aufgrund der Fokussierung im vorliegenden Projekt auf die EAG aus privaten Haushalten erfolgte die Bestimmung der in Verkehr gebrachten Menge (iVgM) soweit wie möglich auf der Basis der Mengen der privaten Endkonsumenten und vergleichbarer Kleinverbraucher. Eine wesentliche Grundlage bildete z. B. der Consumer Electronics Markt Index (CEMIX). Es ergibt sich eine Datenunsicherheit aufgrund der unsicheren 1:1-Relation der iVgM für den Consumer-Markt zu den EAG aus privaten Haushaltungen im Sinne des ElektroG.

Tabelle 39: Berechnetes Abfallpotenzial in Deutschland der Jahre 2012 und 2020

RePro Nr.	Produkt	Durchschnittliche Verweildauer (Jahre)	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2012	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2020	Abfallpotenzial (Stk) 2012	Abfallpotenzial (Stk) 2020
3.1	PC	9	2003	2011	1.790.000	1.444.000
3.2	Laptops, Notebooks	7	2005	2013	1.945.000	5.013.000
3.2.1	Laptop mit CCFL	7	2005	2013	1.945.000	100.260
3.2.2	Laptop mit LED	7	2005	2013	0	4.912.740
3.3	Tablet Computer	5	2007	2015	50.000	7.174.440
3.4	Festplatte Extern	6	2006	2014	17.884.000	5.402.000
3.5	USB Sticks	3	2009	2017	12.999.000	15.041.960
3.6	Projektoren (Beamer)	6	2006	2014	200.000	189.806
3.7	Multifunktionsdrucker	6	2006	2014	2.360.000	3.116.000
3.8	Telefone	10	2002	2010	5.718.760	5.600.000
3.9	Navigationsgeräte	6	2006	2014	2.160.000	2.237.000
3.10	Handy	6	2006	2014	20.740.000	3.005.000
3.11	Smartphones	6	2006	2014	1.100.000	24.128.000
3.12	Digitalkamera (Foto)	11	2001	2009	5.371.000	8.500.000
3.13	Camcorder	11	2001	2009	1.093.333	600.000
3.14	LCD Monitor	12	2000	2008	1.734.000	3.464.000
3.14.1	LCD Monitor mit CCFL	12	2000	2008	1.734.000	3.464.000
3.14.2	LCD Monitor mit LED	12	2000	2008	0	0
3.15	LCD Fernseher	12	2000	2008	200.000	5.900.000

RePro Nr.	Produkt	Durchschnittliche Verweildauer (Jahre)	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2012	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2020	Abfallpotenzial (Stk) 2012	Abfallpotenzial (Stk) 2020
3.15.1	LCD Fernseher mit CCFL	12	2000	2008	200.000	5.605.000
3.15.2	LCD Fernseher mit LED	12	2000	2008	0	295.000
3.16.1	Monitor Röhre	15	1997	2005	4.600.000	240.000
3.16.2	Fernsehgerät Röhre	15	1997	2005	10.000.000	4.060.000
3.17	Fernbedienung	7	2005	2013	60.000.000	41.901.576
3.18	DVD/CD-Player/Videorekorder	12	2000	2008	8.422.500	3.900.000
3.19	Videospiel tragbar	12	2000	2008	100.000	2.182.975
3.20	Videospielkonsole	12	2000	2008	2.958.179	4.700.000
3.21	MP3 Player	5	2007	2015	7.900.000	4.596.000
3.22	Lautsprecherboxen	10	2002	2010	987.048	661.000
3.23	Kopfhörer	2	2010	2018	8.091.000	12.000.000
4.1	Kompaktleuchtstofflampen	6	2006	2014	84.829.538	91.009.157
4.2	LED Lampen	9	2003	2011	0	500.000
4.3	Leuchtstofflampen	6	2006	2014	73.400.841	59.140.089
5.1	Bohrmaschine Akku	10	2002	2010	2.600.000	2.600.000
5.2	Wecker, Batterie	10	2002	2010	6.300.000	6.300.000
5.3	Kaffeemaschine	8	2004	2012	4.934.000	3.000.000

RePro Nr.	Produkt	Durchschnittliche Verweildauer (Jahre)	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2012	Basisjahr der iVgM für Abfallpotenzial 2020	Abfallpotenzial (Stk) 2012	Abfallpotenzial (Stk) 2020
5.4	Rasierapparate	5	2007	2015	4.680.000	5.000.000

Die Berechnung der Mengenpotenziale der RePro-Metalle im Abfallpotenzial der RePro-Geräte für die Jahre 2012 und 2020 zeigt Trends in der Materialzusammensetzung des EAG-Abfallstroms. Die Zunahme des Mengenpotenzials von Indium und Yttrium ist auf den Technologiewandel von Röhrengeräten hin zu Flachbildschirmgeräten zwischen 2000 und 2008 zurückzuführen. Bildschirmgeräte und Laptops mit LED-Hintergrundbeleuchtung spielen auch im Jahr 2020 nur eine untergeordnete Rolle im Abfallstrom. Die Zunahme an batteriebetriebenen Geräten führt zudem zu einer Zunahme der Kobaltmenge im Abfallstrom bis 2020 im Vergleich zum Jahr 2012.

3.9 Sortieranalyse

Gegenstand dieses Kapitels ist die zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise und Ergebnisse einer Sortieranalyse für Altgeräte der Sammelgruppen (SG) 3 und 5. Ziel der Sortieranalyse war es, anhand einer Stichprobe von 30 Elektroaltgeräte-Containern Aufschluss über die Zusammensetzung der Sammelgruppen, das heißt die Art und Menge der enthaltenen Gerätearten zu erhalten.

3.9.1 Vorgehen

Die Analyse der Elektroaltgeräte erfolgte im Zeitraum vom 22.05.2012 bis zum 13.06.2012. Die Container mit den Elektroaltgeräten der untersuchten Sammelgruppen 3 und 5 stammten aus der Sammlung der örE. Die Anzahl der Container wurde nach der Relevanz der Sammelgruppe für die ausgewählten ressourcenrelevanten Geräte mit 24 Containern der SG 3 und 6 Containern der SG 5 gewichtet.

Die Container wurden zunächst verwogen. Die Protokollierung der Elektroaltgeräte, die in den Containern der SG 3 und SG 5 enthalten waren, erfolgte über eine Strichliste. Es wurde eine gemeinsame Liste geschaffen, da beide Sammelgruppen EAG aus der jeweils anderen Gruppe enthielten. Es wurde zunächst ein Entwurf einer Liste auf der Basis der erwarteten Gerätearten entwickelt und diese Liste in einer Arbeitsschicht angewandt. Daraufhin erfolgte eine Überarbeitung und Ergänzung der Liste (genannte Geräte, Formulierung).

Die Identifizierung und Protokollierung der Geräte wurde in die Arbeitsabläufe des Erstbehandlers so weit wie möglich integriert. Aufgrund des Zustandes der Geräte (hoher Zerstörungsgrad) wurde für die Gewichtsbestimmung pro Gerät ein Durchschnittsgewicht angesetzt, das je nach Gerät über Wägung einer Geräteprobe aus der Sortieranalyse oder Literaturangaben bestimmt wurde.

3.9.1.1 Sammelgruppe 3 – Informations- und Kommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik

Die Elektroaltgeräte der SG 3 wurden von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr in zwei Schichten von Montag bis Freitag protokolliert. Der Prozess begann auf dem Außengelände mit dem Abkippen der Elektroaltgeräte aus dem Container auf den Boden. Chargenweise wurden die Elektroaltgeräte mittels eines Radladers auf einen Schubbodenförderer gegeben und anschließend manuell in Kisten umgeladen und auf einem Rollenband zur manuellen Demontage und Sortierung transportiert. Bevor die EAG an die Arbeiter verteilt wurden, wurden die Kisten per Hand durchgesehen, jedes einzelne enthaltene Gerät identifiziert und in der Strichliste protokolliert. Bei Bedarf wurde die Liste um weitere Geräte ergänzt. Dieser Prozess wird in Abbildung 15 dargestellt.

Abbildung 15: SG3 Identifizierung und Protokollierung



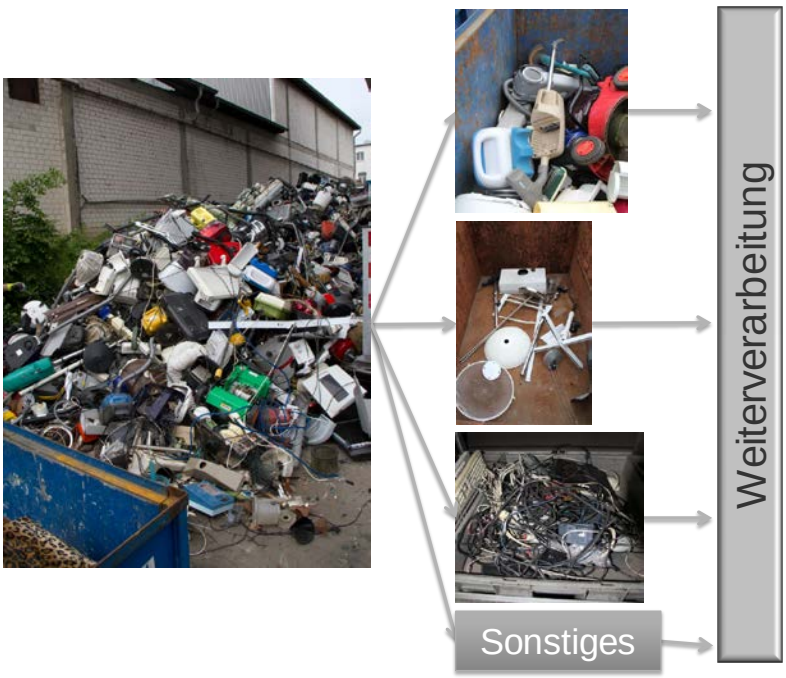
Quelle: eigene Darstellung

Ein Problem bestand im Umgang mit zerbrochenen Geräten, der überwiegende Teil der Geräte der SG 3 war zerbrochen. Um eine Protokollierung der Anzahl der Geräte vornehmen zu können, wurden Hauptkomponenten der Geräte bestimmt (z. B. bei Fernsehern der Bildschirm und bei PC die Hauptplatine), nach denen die Zählung erfolgte.

3.9.1.2 Sammelgruppe 5 – Haushaltskleingeräte und andere Geräte

Die SG5 wurde im Freien von 7:00 bis 16:00 Uhr von Montag bis Freitag in einer Schicht sortiert und protokolliert. Der Prozess begann mit dem Abkippen der EAG aus dem Container auf den Boden. Anschließend erfolgte die manuelle Sortierung in Container.

Abbildung 16: SG5 Sortierfraktionen



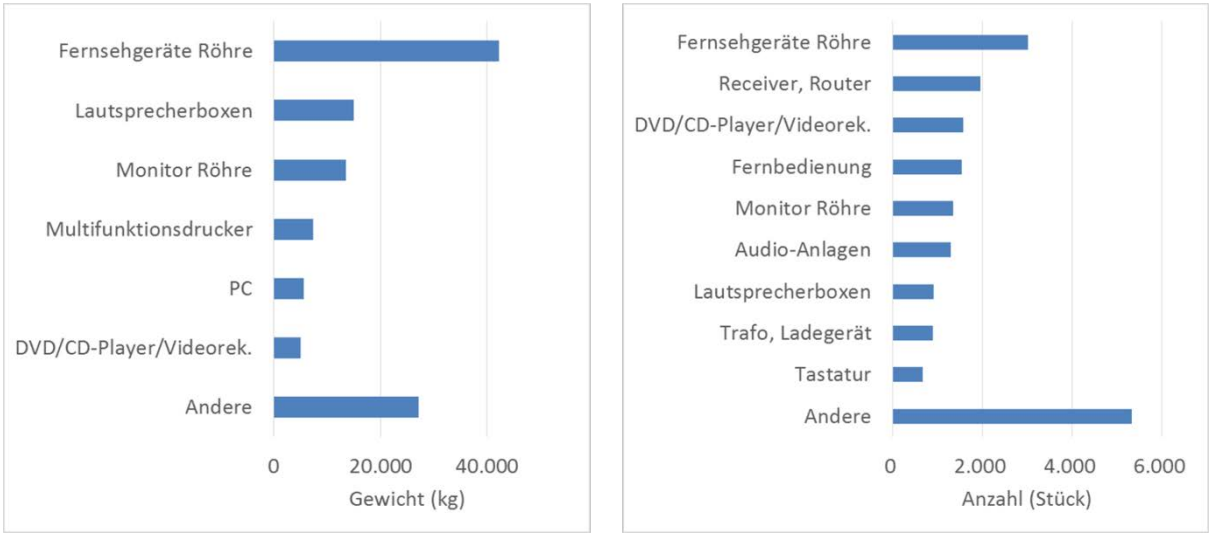
Quelle: eigene Darstellung

3.9.2 Ergebnisse Sammelgruppe 3 – IKT und Unterhaltungselektronik

Für die Analyse wurden 24 Container der SG 3 sortiert. Es handelte sich um geschlossene Container mit Geräten in loser Schüttung. Innerhalb dieser 24 Container ergaben sich 85 Gerätearten[25]. Es wurden 19.133 Geräte identifiziert und protokolliert mit einem Gesamtgewicht von 116 t (einschließlich Fehlwürfe). Die Abbildung 17 unten zeigt die Ergebnisse nach Geräteanzahl und Gewicht (einschließlich Fehlwürfe).

[25] Teilweise wurde während der Protokollierung eine Unterteilung der Gerätearten vorgenommen, wenn z. B. Gewichtsbestimmungen vorgenommen werden sollten oder wenn dies die Identifizierung und Protokollierung der Produktarten in den schnellen Arbeitsabläufen erleichterte.

Abbildung 17: Zusammensetzung der SG3 Container („Andere“ umfasst Gerätearten, die in ihrer Summe jeweils ca. 30 % der Anzahl bzw. des Gewichts ausmachten)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

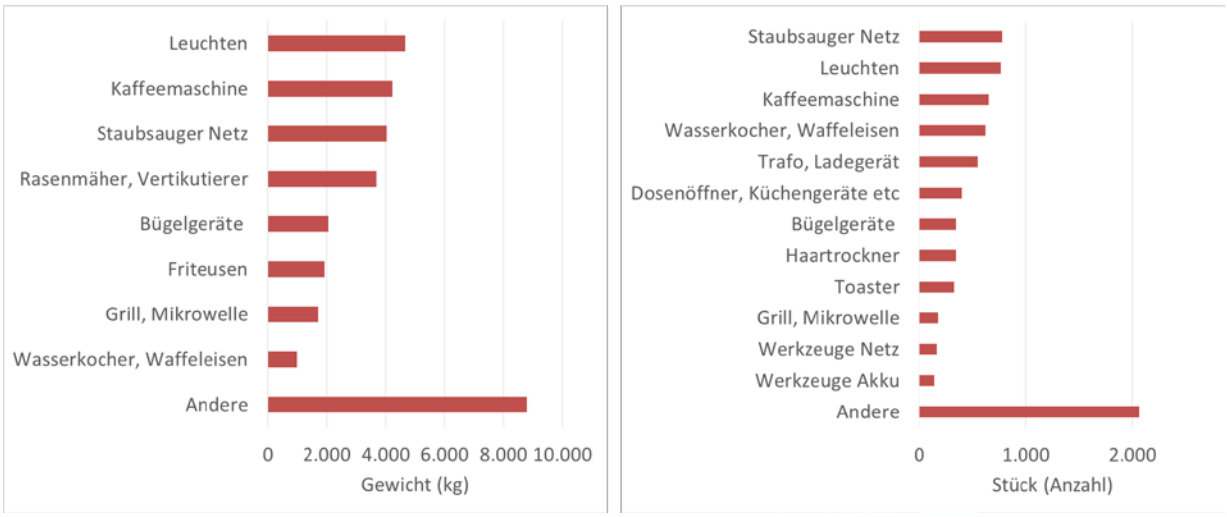
8 Gew% (13 % bezogen auf die Stückzahl) waren Fehlwürfe. Die 5 massenrelevantesten Gerätearten bei den Fehlwürfen waren Leuchten (245 Stk., 1,5 t), Waagen (648 Stk., 1,2 t), Friteusen (34 Stk, 0,6 t), Staubsauger Netz (91 Stk., 0,5 t) und Spielzeug elektrisch (92 Stk. 0,5t).

3.9.3 Ergebnisse Sammelgruppe 5 – Haushaltskleingeräte und andere Geräte

Bei der SG 5 wurden 73 Gerätearten identifiziert (entsprechend 7.283 Geräte und 32 t), von denen 50 zur SG 5 gehörten (entsprechend 5.375 Geräte und 25,5 t). Die Fehlwurfquote lag bei 26 % bezogen auf die Stückzahl und 20 % bezogen auf das Gewicht. Die massenrelevantesten Gerätearten bei den Fehlwürfen waren die Leuchten (762 Stk, 4,6 t), Lautsprecherboxen (53 Stk, 0,8 t), Audio-Anlagen (106 Stk, 0,3 t), Trafos, Ladegeräte (548 Stk, 0,2 t) und Drucker (16 Stk, 0,2 t).

Abbildung 18 unten zeigt die Ergebnisse bezogen auf Anzahl und Gewicht (einschließlich Fehlwürfe).

Abbildung 18: Zusammensetzung der SG5 Container („Andere“ umfasst Gerätearten, die in ihrer Summe jeweils ca. 30 % der Anzahl bzw. des Gewichts ausmachten)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

3.9.4 Diskussion der Ergebnisse

Tabelle 40 vergleicht die Ergebnisse der RePro-Sortieranalyse (ohne Fehlwürfe) mit den Daten der stiftung ear. Dabei zeigt sich auf der Aggregationsebene der ear-Daten eine relativ gute Übereinstimmung der beiden Ansätze.

Tabelle 40: Vergleichende Ergebnisse zwischen ear-System-Analyse (ear 2012) und RePro-Analyse (ohne Fehlwürfe) (Basis: Gewicht)

Kategorie	Kat. Nr.	Geräteart	stiftung ear Stand 1.1.2012	RePro Sortier-analyse
SG 3 - Informationstechnologie und Telekommunikation	3	Persönliche Informations- und/oder Datenverarbeitung	9 %	7 %
	3	Persönliches Drucken von Informationen u. Übermittlung gedruckter Informationen	9 %	16 %
	3	Persönliche Kommunikationsgeräte	0,5 %	0,6 %
	3	Mobil-Telefone	0,5 %	0,0 %
	3	Datensichtgeräte	24 %	13 %
	3	Kameras (Foto)	0,1 %	0,1 %
SG 3 - Unterhaltungselektronik	4	TV-Geräte	43 %	40 %
	4	Übrige Geräte der Unterhaltungselektronik (mit Ausnahme von TV-Geräten)	14 %	23 %

Kategorie	Kat. Nr.	Geräteart	stiftung ear Stand 1.1.2012	RePro Sortier-analyse
SG 5 - Haushaltskleinge-räte	2	Haushaltskleingeräte	64,01 %	74 %
SG 5 - Beleuchtungskörper	5	Lichtsteuergeräte	0,25 %	0 %
SG 5 - Werkzeuge	6	Werkzeuge	33,10 %	24 %
SG 5 - Spielzeug, Sport- und Freizeitgeräte	7	Spielzeug	0,98 %	1 %
	7	Sport- und Freizeitgeräte	0,58 %	0,04 %
SG 5 - Medizinprodukte mit Ausnahme implantier-ter und infektiöser Pro-dukte	8	Medizinprodukte	0,36 %	1 %
SG 5 - Überwachungs- und Kontrollinstrumente	9	Überwachungs- und Kontrol-linstrumente	0,72 %	0,1 %

Bei der RePro-Sortieranalyse wurden mehr Geräte zum persönlichen Drucken von Informationen und der Übermittlung gedruckter Informationen vorgefunden, weniger Datensichtgeräte und mehr übrige Geräte der Unterhaltungselektronik als in der ear-Analyse. Die ear-Analyse ermittelte zudem einen 50-fach höheren Handy-Anteil als die Sortieranalyse. Ein Teil dieser Differenz ist allerdings wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Daten der stiftung ear mehr als nur Handys unter der „Handy"-Rubrik zusammenfasst (z. B. auch Netzteile[26]).

Bei den Containern der SG 5 ist die größte Abweichung bei den Werkzeugen festzustellen.

Die Ergebnisse der RePro-Sortieranalyse wurden zudem mit Entsorgern, die Erstbehandlungsanlagen betreiben, diskutiert, und es wurde um eine grobe Einschätzung gebeten, ob die Ergebnisse der Zusammensetzung des eigenen Inputs entsprechen. Dabei konnten drei Entsorger sowie das Institut INFA eine vergleichende Einschätzung abgeben. Bei zwei Entsorgern lagen keine Informationen für einen Vergleich vor. Folgende Rückmeldungen wurden gegeben:

- Erstbehandler mit Standort in Westdeutschland, Input aus unterschiedlichen Siedlungsstrukturen: Im eigenen Input werden höhere Anteile von Röhrengeräten und Flachbildschirmen festgestellt. Darüber hinaus wurden die Mengenverteilungen sowohl in SG3 als auch in SG5 bestätigt.
- Erstbehandler mit Standort in Mitteldeutschland, gemischter Input aus unterschiedlichen Siedlungsstrukturen: Aus früheren Untersuchungen zum eigenen Input konnten die Ergebnisse der RePro Sortieranalyse bestätigt werden. Aktuell unterscheiden sich die Zusammensetzungen der Container so stark, dass keine Aussage getroffen werden kann.

[26] Netzteile, die bei der RePro Sortieranalyse gefunden wurden, waren in der Regel nicht einer bestimmten Geräteart zuzuordnen.

- Erstbehandler mit Standort in Norddeutschland, gemischter Input aus verdichteten Siedlungsstrukturen: Die Ergebnisse der RePro-Sortieranalyse entsprachen dem eigenen Input.
- INFA: Verschiedene Herkunftsgebiete: Die Zusammensetzung der SG 3 von UE und ITK entspricht in etwa den Erfahrungen von INFA, lediglich der Anteil Lautsprecherboxen erscheine relativ hoch. In SG 5 entspreche das Verhältnis Kat. 2 zu restlichen Kategorien ebenfalls ungefähr den Erfahrungen von INFA. Angemerkt wird, dass Grills/Mikrowellen nicht zur SG 5 gerechnet werden, sondern als Fehlwurf in der SG 5 behandelt werden.

Die Sortieranalyse zeigte, dass die Auswahl der ressourcenrelevanten Geräte 65 Gew.-% der in den Containern festgestellten Gerätearten abdeckt (entsprechend 97 t) bzw. 43 % bezogen auf die Stückzahl (entsprechend 11.250 Stück).

3.10 Größen der RePro-Altgeräte

Im Zusammenhang mit der Entwicklung erweiterter Sammelsysteme und den neuen Produktkategorien der WEEE2 ist die Größe der RePro-Geräte unter anderem in Bezug auf die Sammlung in Depotcontainern relevant. Üblicherweise liegen die Größen der Einwurföffnungen im Bereich um 50 cm. Im Februar 2014 erfolgte daher eine Größenerfassung von Altgeräten in Anlieferungen von SG 3 und SG 5 30-m³-Containern von örE bei einem Erstbehandler. Dabei wurden 3.818 Geräte der SG 3 und 3.663 Geräte der SG 5 im Hinblick auf ihre Größenklassen kategorisiert. Vor dem Hintergrund der Anforderungen der WEEE-Richtlinie zur 0:1-Sammlung im Handel wurde zusätzlich geprüft[27], welche EAG in die Größenkategorie bis 25 cm fallen („keine äußere Abmessung über 25 cm“, Artikel 5.2 der WEEE-Richtlinie). Die Ergebnisse sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Größenkategorisierung der RePro-Geräte

RePro-Nr.	Gerät	< 50 cm	ca. 50 cm	> 50 cm	überwiegend bis 25	überwiegend > 25
3.1	PC	73 %	25 %	2 %		X
3.2	Laptops, Notebooks	100 %	0 %	0 %		X
3.3	Tablet	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.4	Festplatte extern	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.5	USB Sticks	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.6	Projektoren	100 %	0 %	0 %		X
3.7	Multifunktionsdrucker	100 %	0 %	0 %		X
3.8	Telefone	100 %	0 %	0 %	X	
3.9	Navigationsgeräte	k. A.	k. A.	k. A.	X	

[27] Basis: Recherche Internetportale November 2013

RePro-Nr.	Gerät	< 50 cm	ca. 50 cm	> 50 cm	überwiegend bis 25	überwiegend > 25
3.10	Handy	100 %	0 %	0 %	X	
3.11	Smartphones	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.12	Kameras inkl. Überwachungskameras	100 %	0 %	0 %	X	
3.13	Camcorder	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.14	LCD-Monitore	Separate Sammlung				
3.15	LCD-Fernseher	Separate Sammlung				
3.16.1	Monitor Röhre	k. A.	k. A.	k. A.		X
3.16.2	Fernseher Röhre	k. A.	k. A.	k. A.		X
3.17	Fernbedienung	100 %	0 %	0 %	X	
3.18	DVD/CD-Player	100 %	0 %	0 %		X
3.19	Videospiel tragbar	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.20	Videospielkonsolen	100 %	0 %	0 %	X	
3.21	MP3 Player	k. A.	k. A.	k. A.	X	
3.22	Lautsprecherboxen	89 %	8 %	3 %	X	X
3.23	Kopfhörer	k. A.	k. A.	k. A.	X	
4.1	Kompaktleuchtstofflampen	Separate Sammlung				
4.2	LED Lampen	Separate Sammlung				
4.3	Leuchtstofflampen	Separate Sammlung				
5.1	Bohrmaschine Akku	98 %	1 %	1 %	X	X
5.2	Uhren	80 %	20 %	0 %	X	
5.3	Kaffeemaschine	84 %	12 %	4 %		X
5.4	Rasierapparate	100 %	0 %	0 %	X	

Legende: k. A.: Gerät wurde in der Untersuchung nicht in den angelieferten Mengen gefunden.

Ein Viertel der PC weist eine Kantenlänge von ca. 50 cm bzw. teilweise auch darüber auf und kann daher möglicherweise nicht erfasst werden. Die vergleichbare Größenordnung bei Uhren wird als weniger ressourcenrelevant eingestuft, da die Konzentration der RePro-Metalle in diesen Produkten deutlich geringer ist. Die Untersuchung zeigt auch, dass die überwiegende Anzahl der besonders ressourcenrelevanten RePro-Geräte, die nicht sowieso aufgrund ihrer Schadstoffgehalte getrennt gesammelt werden müssen (Bildschirmgeräte), in die Kategorie < 25 cm fallen. Als besonders ressourcenrelevante Geräte in der Kategorie > 25 cm sind die PC und Laptops zu nennen. DVD/CD-Player ent-

halten in der Regel Leiterplatten der mittleren bzw. unteren Wertgruppen. Aktive Lautsprecherboxen, die entsprechende Elektronik enthalten (und ggf. Neodym-Lautsprechermagnete) fallen in Bezug auf ihre Anzahl überwiegend in die Kategorie < 25 cm.

3.11 Erfasste Mengen

Auf der Basis der Sortieranalyse wurde eine theoretische Sammelquoten für RePro-Geräte bestimmt, indem die ermittelten Mengen der erfassten RePro-EAG ins Verhältnis zum Abfallpotenzial gesetzt wurden. Die folgende Tabelle 42 stellt die für ein Jahr hochgerechnete gesammelte Menge dem Abfallpotenzial gegenüber.

Tabelle 42: Überblick über die hochgerechnete Sammelmenge sowie das Abfallpotenzial für RePro-Produkte für das Jahr 2012

RePro Nr	Altprodukt	Gesammelt (Hochrechnung) (Stück/a)	Abfallpotenzial (Stück/a)	Anteil nicht gesammelt (%)
3.1	PC	1.563.085	1.790.000	13 %
3.2	Laptops, Notebooks	166.066	1.945.000	91 %
3.3	Tablet Computer	0	50.000	100 %
3.4	Festplatte Extern	21.351	17.884.000	100 %
3.5	USB Sticks	4.744	12.999.000	100 %
3.6	Projektoren (Beamer)	80.764	200.000	60 %
3.7	Multifunktionsdrucker	408.329	2.360.000	83 %
3.8	Telefone	1.259.490	5.718.760	78 %
3.9	Navigationsgeräte	9.487	2.160.000	100 %
3.10	Handy	208.719	20.740.000	99 %
3.11	Smartphones	7.115	1.100.000	99 %
3.12	Digitalkamera (Foto)	170.782	5.371.000	97 %
3.13	Camcorder	18.974	1.093.333	98 %
3.14	LCD Monitor	355.766	1.734.000	79 %
3.15	LCD Fernseher	106.730	200.000	47 %
3.16.1	Monitor Röhre	3.190.035	4.600.000	31 %
3.16.2	Fernsehgerät Röhre	7.153.315	10.000.000	28 %
3.17	Fernbedienung	3.652.542	60.000.000	94 %
3.18	DVD/CD-Player/Videorekorder	3.735.652	8.422.500	56 %
3.19	Videospiel tragbar	16.602	100.000	83 %

Re-Pro Nr	Altprodukt	Gesammelt (Hochrechnung) (Stück/a)	Abfallpotenzial (Stück/a)	Anteil nicht gesammelt (%)
3.20	Videospielkonsole	45.094	2.958.179	98 %
3.21	MP3 Player	9.487	7.900.000	100 %
3.22	Lautsprecherboxen	2.163.414	987.048	(-119 %)
3.23	Kopfhörer	175.521	8.091.000	98 %
4.1	Kompaktleuchtstofflampen	andere Sammelsysteme	84.829.538	andere Sammelsysteme
4.2	LED Lampen		0	
4.3	Leuchtstofflampen		73.400.841	
5.1	Bohrmaschine Akku	335.499	2.600.000	87 %
5.2	Wecker, Batterie	0	6.300.000	100 %
5.3	Kaffeemaschine	76.004	4.934.000	98 %
5.4	Rasierapparate	225.608	4.680.000	95 %

Der hohe Anteil der erfassten PC kann ggf. dadurch bedingt sein, dass nur die PC des privaten Gebrauchs (Consumer Market laut CEMIX) aufgenommen wurden, ggf. aber auch PC aus dem Geschäftsbereich in die Sammlung der örE kommen. Würden die PC aus dem Geschäftsbereich vollständig berücksichtigt, läge der Anteil der nicht gesammelten Geräte bei ca. 70 %.

Kompaktleuchtstofflampen, LED Lampen und Leuchtstofflampen wurden nicht berücksichtigt, da diese Altgeräte in anderen Systemen gesammelt werden und nicht Gegenstand der Sortieranalyse waren.

Der negative Wert bezüglich des Anteils nicht gesammelter Geräte für Lautsprecherboxen kann durch einen schnelleren Produktaustausch bei den Nutzern aufgrund des Technologiewandels (Aktivboxen) bedingt sein.

Die sehr niedrigen Erfassungswerte für Laptops, Tablets, Smartphones, Handys, Camcordern bzw. Digitalkameras und Navigationsgeräte stimmen mit den Aussagen der Erstbehandler überein, dass solche sehr werthaltigen Gerätearten nur selten in den Anlieferungen zu finden seien.

Bei USB Sticks und MP3 Playern wird vermutet, dass sie aufgrund der geringen Größe besonders häufig in andere Abfallströme gelangen.

3.12 Weitere Verbleibwege

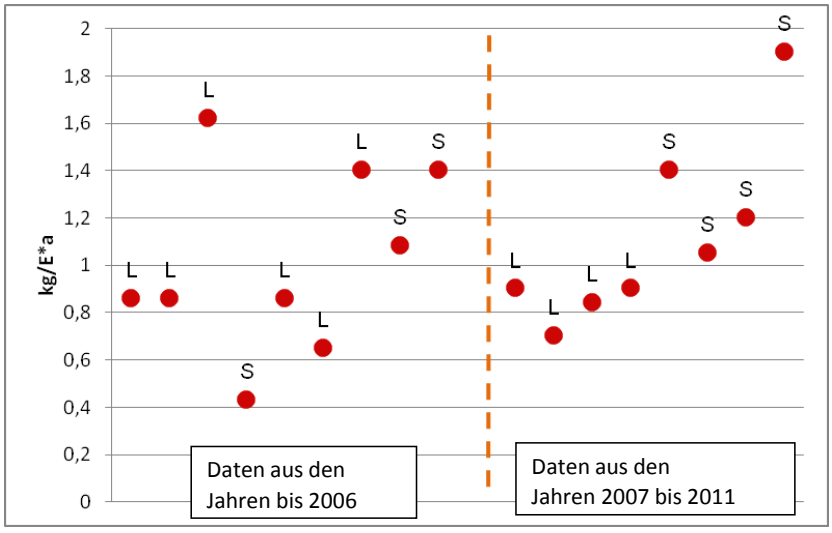
3.12.1 EAG im Restabfall

Nach dem ElektroG ist eine gemeinsame Entsorgung von Elektroaltgeräten und unsortierten Siedlungsabfall bzw. Restabfall nicht erlaubt. Tatsächlich finden sich jedoch auch Elektroaltgeräte im Restabfall.

Restabfallanalysen werden oftmals auf einer Differenzierungsebene durchgeführt, bei der keine explizite Ausweisung von EAG erfolgt, sondern diese vielmehr in der Gruppe „Verbunde“ enthalten sind. Erfolgt z. B. eine Sortierung nach der zweiten Differenzierungsebene der Brandenburger bzw. Sächsischen Sortierrichtlinie (Sachsen 2010), werden Elektroaltgeräte als Gruppe ausgewiesen. Bei einer Restabfallanalyse nach der dritten Differenzierungsebene würden EAG in weiße und braune Ware sowie IT unterschieden.

Die folgende Abbildung 19 zeigt einen Überblick der Ergebnisse verschiedener Restabfallanalysen (Systemabfuhr aus dem kommunalen Bereich), in denen EAG explizit ausgewiesen wurden. Die Werte links der vertikalen Linie stellen Analysen aus der Zeit bis zum Jahr 2006, dem Jahr, als das ElektroG in Kraft trat, dar, die Werte rechts der vertikalen Linie Werte aus dem Zeitraum von 2007 bis 2011.

Abbildung 19: Spezifische Elektroaltgeräte-Mengen im Restabfall aus der Systemabfuhr nach verschiedenen Quellen (eigene Zusammenstellung nach verschiedenen Quellen) (L=Landkreis, S=Stadt)



Quelle: eigene Darstellung

Der Mittelwert liegt bei 1,1 kg/E*a. Bei einer Einwohnerzahl von 82 Millionen im Jahr 2008 entspräche dies einer gesamten Masse von etwa 91.000 t. Bei den über den Restmüll entsorgten EAG handelt es sich um mittlere bis kleine Geräte und damit auch um RePro-Geräte.

Nur wenige Restmüllanalysen haben die Arten der EAG im gemischten Siedlungsabfall explizit ausgewiesen bzw. quantifiziert. Im Folgenden werden einige Beispiele dargestellt.

3.12.1.1 Restmüllanalyse INTECUS

Zur Ermittlung der EAG in gemischt erfassten Abfallströmen wurden ca. 46 m^3 Abfall analysiert; darin waren ca. 0,2 m^3 EAG und NE-Metallprodukte enthalten.

Tabelle 43: Spezifische Menge EAG im Restabfall (kg/E*a)

PK	Geräteart	Untersuchung 1	Untersuchung 2	Untersuchung 3
1.	Haushaltsgroßgeräte	0,00	0,00	0,00
2.	Haushaltskleingeräte	0,07	0,05	0,01
3.	Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik	0,13	0,17	0,38
4.	Geräte der Unterhaltungs-elektronik	0,03	0,02	0,00
5.	Beleuchtungskörper	0,72	0,08	0,41
6.	Elektrische und elektronische Werkzeuge	0,00	0,00	0,00
7.	Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	0,02	0,09	0,01
8.	Medizinprodukte mit Ausnahme implantierter und infektiöser Produkte	0,00	0,00	0,00
9.	Überwachungs- und Kontrollinstrumente	0,01	0,00	0,00
10.	Automatische Ausgabegeräte	0,00	0,00	0,00
	Summe	**0,99**	**0,41**	**0,82**

Bei den im Restmüll gefundenen EAG handelte es sich um: Laptop, Modem, Energiesparlampen, Controller für Konsolen, Kopfhörer, Miniradio, Wecker, Handys + Ladegerät, Armbanduhr, Taschenrechner, Bügeleisen, Stoppuhr, E-Feuerzeug, E-Zahnbürste sowie Taschenlampe.

Tabelle 44: Spezifische Menge EAG in der Gelben Tonne (kg/E*a)

PK	Geräteart	Untersuchung 1	Untersuchung 2	Untersuchung 3
1.	Haushaltsgroßgeräte	0,02	0,00	0,00
2.	Haushaltskleingeräte	0,02	0,09	0,01
3.	Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik	0,01	0,00	0,06
4.	Geräte der Unterhaltungs-elektronik	0,00	0,01	0,00
5.	Beleuchtungskörper	0,18	0,16	0,04
6.	Elektrische und elektronische Werkzeuge	0,00	0,00	0,00
7.	Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	0,00	0,01	0,00

PK	Geräteart	Untersuchung 1	Untersuchung 2	Untersuchung 3
8.	Medizinprodukte mit Ausnahme implantierter und infektiöser Produkte	0,00	0,00	0,00
9.	Überwachungs- und Kontrollinstrumente	0,00	0,00	0,00
10.	Automatische Ausgabegeräte	0,00	0,00	0,00
	Summe	**0,22**	**0,28**	**0,11**

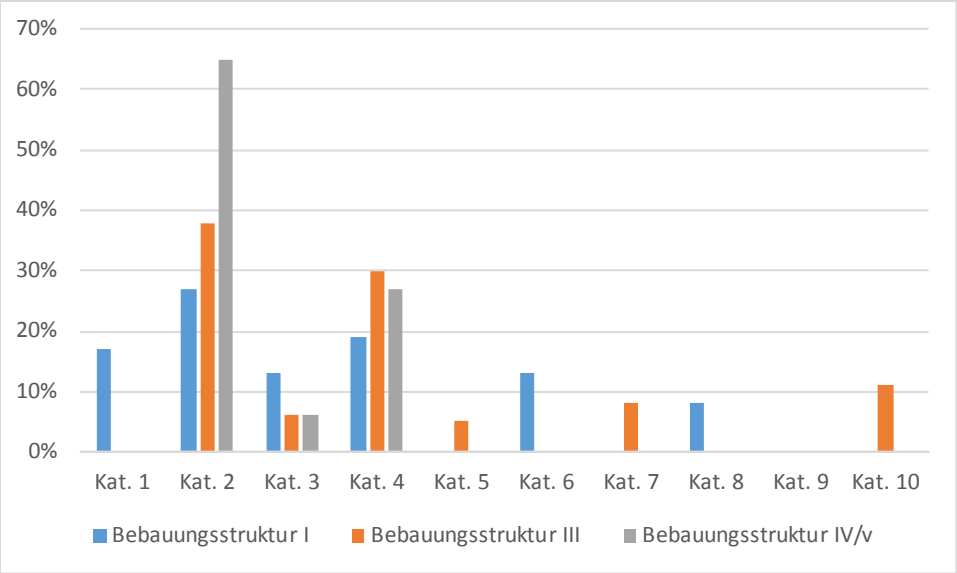
Bei den in der Gelben Tonne gefundenen EAG handelte es sich um: Ventilator, Wasserkocher, Batterieladegeräte, Energiesparlampe, PC-Maus, Notebook, Receiver (USB), Verteilerdose, Fahrradlampe, Lichterkette, Föhn, CD-Player, Pulsuhr, Taschenrechner, Kaffeemaschine, Handy.

Die Daten wurden für eine deutsche Großstadt erhoben und sind hinsichtlich des Anteils und der einwohnerspezifischen Menge mit anderen Erhebungen, beispielsweise von Janz (2010) mit ca.0,8 kg/E*a EAG im Restabfall (BS 1 und 3), vergleichbar. Hinsichtlich der Zusammensetzung der EAG-Fraktion im Restabfall weichen die Ergebnisse beider Erhebungen etwas voneinander ab: Während bei Janz die größten Anteile mit 46 % die Haushaltskleingeräte und mit 24 % die Geräte der Unterhaltungselektronik ausmachen, waren es bei der hier vorgestellten Analyse mit 54 % die Beleuchtungskörper und mit 20 % die Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik. Da die EAG nur einen geringen Anteil des Restabfalls ausmachen, beruht eine weitere Untergliederung nach einzelnen Gerätekategorien auf sehr geringen Mengenanteilen. Dementsprechend sind Abweichungen bei Stichprobeuntersuchungen in dieser Detailtiefe von einem so heterogenen Stoffgemisch wie dem Restabfall nicht untypisch.

3.12.1.2 Restmüllanalyse Dresden

In einer Restmüllanalyse in der Stadt Dresden im Jahr 2009 wurde die Gruppe der nach ElektroG kategorisierbaren Altgeräte von Haushaltskleingeräten (vor allem Föne, Rasierapparate, elektrische Zahnbürsten, Wasserkocher, Kaffeemaschinen, elektrische Messer sowie Staubsauger) und Geräten der Unterhaltungselektronik (vor allem Geräte zur Tonaufnahme und -wiedergabe, Kopfhörer, Lautsprecher sowie Radiogeräte) dominiert. Aus der Kategorie der Haushaltsgroßgeräte fanden sich zwei relativ kleine elektrische Öfen. Hochwertige Geräte aus dem Bereich IT- und Telekommunikation spielten eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Anteile der Kategorien 8 (Medizinprodukte), 9 (Überwachungs- und Kontrollinstrumente) und 10 (Automatische Ausgabegeräte) wurden durch Einzelteile, beispielsweise einer Lupenleuchte aus dem Bereich der Zahnmedizin und eine schwere Registrierkasse hervorgerufen.

Abbildung 20: Verteilung von EAG im Restabfall



Datengrundlage: Janz (2010), eigene Darstellung

3.12.1.3 Restmüllanalyse Hamburg

Bei den Restmüllanalysen in Hamburg im Jahr 2012 wurden 1,4 kg/E*a EAG gefunden. Dabei sind „Ausreißer“ (wie z. B. ein Röhrenmonitor) in der Mengenbestimmung nicht berücksichtigt.

Bei den gefundenen EAG handelte es sich stückbezogen vor allem um Geräte der SG 3 und dort überwiegend – wie auch in Dresden – um Unterhaltungselektronik (Gerätekategorie 4). Die folgende Abbildung zeigt Beispiele aussortierter EAG.

Abbildung 21: Beispiele aussortierter EAG



Quelle: Winterberg (2013)

3.12.1.4 Fazit

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass keine ausreichende Datengrundlage für eine gerätespezifische Schätzung der Verluste von RePro-Metallen über die gemischten Siedlungsabfälle verfügbar ist.

3.12.2 Sperrmüllsammlung

Auf der Basis von VKS-Untersuchungen aus den Jahren 2006 bis 2008 wurde von Sander et al. (2010) geschätzt, dass aus der Sperrmüllsammlung in Deutschland eine Menge von EAG in der Größenordnung bis 50.000 t/a entwendet wird. Janz et.al. (2009) schätzen die Menge der EAG-Diebstähle aus dem Sperrmüll mit einer anderen methodischen Herangehensweise auf 36.000 t bis 122.000 t pro Jahr.

Die Datengrundlage erlaubt keine Schätzung der gerätespezifischen Verluste.

3.12.3 Export

Beim Export von Altgeräten sind drei Wege zu unterscheiden:

a) Der Export im Rahmen der Altgeräteentsorgung im System nach ElektroG.
   Dieser Pfad wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da die Mengen vor dem Export im gewünschten Zielsystem für EAG erfasst worden sind.
b) Der Export von nicht als Altgeräte deklarierten Geräten über den Landweg oder Binnenwasserstraßen, der in der Regel ein Export in EU-Mitgliedstaaten ist.
   Der Export von Geräten über den Landweg bzw. Binnenwasserstraßen, die nicht als Altgeräte deklariert sind, erfolgt oftmals in einem Graubereich der Abgrenzung zwischen Gebrauchtprodukt und Altgerät. Statistische Daten zu den exportierten Mengen liegen nicht vor.
   Im Projekt „Transwaste“ (Lange 2012, Lange 2013) wurde eine stichprobenartige Erhebung in Grenzgebieten sowie Expertenbefragungen vorgenommen. Werden die Ergebnisse dieser Erhebung auf das gesamte Bundesgebiet hochgerechnet, so kann ein Mengenfluss von 200.000 t geschätzt werden (Lange 2012). Allerdings ist nicht sicher, dass für alle Grenzabschnitte ähnliche Mengenströme angenommen werden können. Ökonomischer Treiber für derartige Altgeräteströme sind in der Regel Gefälle bei den Behandlungskosten und vorhandene Second-Hand-/Re-Use-Märkte. Für metallreiche und schadstoffarme Großgeräte können z. B. höhere Erlöse erzielt werden, wenn eine Trennung der enthaltenen Stoffe in reine Fraktionen erfolgt, als bei der mechanischen Behandlung in Großschreddern. Bei schadstoffhaltigen Geräten können sich ferner höhere Erlöse durch geringere Umweltschutzanforderungen in der Praxis in den Empfängerstaaten ergeben. Diese ökonomischen Treiber liegen in einigen Grenzgebieten jedoch nicht vor (z. B. im Nordwesten). Die Transportkosten aus solchen Gebieten in Länder mit niedrigen Entsorgungskosten können die vermeintlichen Erlöse jedoch aufzehren.
   Die vorhandenen Erhebungen erlauben keine gerätespezifischen Aufschlüsselungen der Exporte.
c) Der Export von nicht als Altgeräte deklarierten Geräten über den Seeweg, der in der Regel in Nicht-EU-Staaten erfolgt.
   Die Gesamtmenge der über den Hamburger Hafen in Nicht-EU-Staaten exportierten gebrauchten Elektrogeräte und Elektroaltgeräte wird auf rund 155.000 t in 2008 geschätzt (Sander et al. 2010). Grundlage dieser datenbasierten Schätzung waren Auswertungen verschiedener Statistiken inkl. spezifischer Hafenstatistiken, Wertbetrachtungen sowie Exportkontrollen. Zur Frage der Abgrenzung zwischen Gebrauchtgeräten und Altgeräten wurde die Anlaufstellen-Leitlinie Nr 1 über die Verbringung von Elektroaltgeräten zur EG-Abfallverbringungsverordnung herangezogen.

In der Studie konnten nur direkte Exporte über den Hamburger Hafen in Nicht-EU-Staaten erfasst werden. Es ist bekannt, dass neben diesen Direktexporten auch Exporte über Transitländer erfolgen, bei denen die Geräte aus Deutschland von Häfen in Nachbarstaaten verschifft werden (Niederlande, Belgien, Frankreich).
Die Exporte im Jahr 2008 bestanden im Wesentlichen in Röhrenbildschirmen (Monitore, TV) und Kühlschränken. Kleine Geräte wurden seltener exportiert, wobei zu vermuten ist, dass diese Geräte zwar nicht in den Exportangaben nicht enthalten waren, tatsächlich aber dennoch exportiert wurden. Dies zeigte sich auch im Rahmen von Kontrollen der exportierten Container sowie von Beiladungen bei Gebrauchtwagenexporten.

Auch hier kann, wie schon für die Exporte über Landwege, festgestellt werden, dass weder Primärdaten verfügbar sind, um die Exporte gerätespezifisch aufzuschlüsseln, noch aus den Exportwegen oder den ökonomischen Treibern solche Schätzungen abgeleitet werden können.

4 Sammlung von EAG

4.1 Einfluss von Nähe und Bequemlichkeit auf das Entsorgungsverhalten bei Elektroaltgeräten

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über verschiedene relevante Literatur aus verschiedenen Ländern zu der Frage, inwiefern die Bequemlichkeit und weitere Einflussfaktoren bei der Abgabe von EAG das Entsorgungsverhalten von Endverbrauchern bei Elektroaltgeräten beeinflussen. Ein Großteil der Studien ist in den USA durchgeführt worden und beschäftigt sich nicht speziell mit Elektroaltgeräten, sondern mit der Entsorgung von anderen Materialien, wie z. B. Glas, Papier oder Textilien. Verbraucher in den USA haben die Möglichkeit, entweder ihren gesamten Abfall in eine Tonne zu werfen oder ihren Müll zu trennen und somit die Rückgewinnung von Rohstoffen zu erleichtern. Diese Mülltrennung ist entweder bei Wertstoffhöfen oder durch regelmäßige haushaltsnahe Sammlung, d. h. Abholung am Bordstein („Curbside Recycling“) möglich und unterscheidet sich je nach Region. Viele Studien untersuchen dabei den Einfluss verschiedener externer (z. B. Distanz zum Wertstoffhof) und interner (z. B. Einstellung zum Umweltschutz) Merkmale auf die Frage, ob und welcher Anteil der Materialien getrennt wird.

In vielen Studien wurde ein Zusammenhang zwischen der Entfernung des Wertstoffhofs und der Anzahl der Besuche dort festgestellt (Tanskanen 2012). Sidique (2008) fand bei einer Befragung von Besuchern verschiedener Wertstoffhöfe in Michigan heraus, dass die Anzahl der Fahrten zum Hof pro zusätzliche Meile Anfahrtsweg um 1 % sinkt. Die Studie zeigte ebenfalls, dass Wertstoffhöfe, bei denen viele verschiedene Materialien entsorgt werden können, in kürzeren Abständen aufgesucht werden[28].

In einer weiteren Studie untersuchte Sidique (2008), welche Faktoren die Entscheidung der Verbraucher beeinflussen, einen von acht verschiedenen Wertstoffhöfen aufzusuchen. Dabei wurden Besucher der Wertstoffhöfe befragt, wie häufig sie die einzelnen Wertstoffhöfe aufsuchen. Als relevante Faktoren wurden die Entfernung, die Anzahl der verschiedenen angenommen Materialien, der Sortieraufwand[29] sowie die Öffnungszeiten des Hofs genannt. Die Identifikation der Faktoren erfolgte durch die Erhebung der Merkmale für die verschiedenen Wertstoffhöfe und den statistischen Abgleich mit dem berichteten vergangenen Verhalten[30] der Verbraucher. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten ebenfalls, dass bei Vollzeitbeschäftigten der Einfluss der Entfernung und der Öffnungszeiten auf die Auswahl des Wertstoffhofs größer ist als bei der restlichen Bevölkerung.

Vining und Ebreo (1990) stellten bei einer Befragung von 197 Haushalten in Illinois fest, dass „Nicht-Recycler“[31] eine zu weite Entfernung des Wertstoffhofs, das Fehlen eines geeigneten Fahrzeugs, fehlende Zeit, fehlende Informationen und fehlende Entlohnung als

[28] Allerdings sind häufige Besuche nicht immer wünschenswert. So weisen Spears und Tucker (2001) darauf hin, dass etwa ein Drittel der Umweltbelastungen, die durch Fahrten zum Wertstoffhof entstehen, durch Bündelung der Besuche eingespart werden könnten.

[29] Ein geringerer Sortieraufwand bedeutet in dieser Studie, dass bei einigen Wertstoffhöfen mehrere verschiedene Materialien im gleichen Behälter gesammelt wurden.

[30] Welcher Wertstoffhof wurde in der Vergangenheit wie oft aufgesucht.

[31] Personen, die keinen Müll trennen.

Hinderungsgründe bei der Nutzung von Wertstoffhöfen sehen. Domina und Koch (2002) fanden ebenfalls durch Befragungen heraus, dass für Personen, die grundsätzlich Mülltrennung betreiben, das Fehlen einer „Curbside Collection“ für Alttextilien der Hauptgrund ist, diese nicht recyclinggerecht zu entsorgen. Folz (1991) untersuchte Teilnahmequoten an verschiedenen Recyclingprogrammen in den USA und stellte fest, dass bei „Curbside Collection“ etwa die Hälfte der Bürger teilnahm, während von den Personen ohne Zugang dazu lediglich 25 % einen Wertstoffhof aufsuchten. Saphores et al. (2006) befragten verschiedene Personengruppen, wie viel sie bereit wären, für die Errichtung eines Wertstoffhofs in ihrer Nähe zu bezahlen. Personen in ländlichen Regionen zeigten dabei eine höhere Zahlungsbereitschaft. Saphores et al. (2006) vermuten, dass dies der Fall ist, weil sich gerade diese Personen bequemere und nähere Entsorgungsmöglichkeiten wünschen.

Ando und Gosselin (2007) untersuchten Faktoren, die Mülltrennung in US-amerikanischen Mehrfamilienhäusern beeinflussen. In der Stadt Urbana, in der die Untersuchung stattfand, konnten die Bewohner Papier und Verpackungsmüll[32] in Sammelcontainer in der Nähe der Wohnhäuser werfen. Außerdem gab es Restmüllcontainer, die an anderen Stellen in ähnlicher Entfernung standen. Die Bewohner wurden gefragt, welchen Anteil an Papier- und Verpackungsmüll sie in die dafür vorgesehen Sammelcontainer werfen und welcher Anteil im Restmüll landet. Bei Verpackungsmüll hatte die Entfernung des Sammelcontainers einen großen Effekt auf die dort entsorgte Menge. Laut der Autoren könnte die Menge an recycelten Verpackungen im Untersuchungsgebiet um 66 % erhöht werden, wenn die Sammelcontainer direkt vor der jeweiligen Haustür platziert würden.

Beigl et al (2010) kommen im Vergleich verschiedener Sammelsysteme für Mobiltelefone in Österreich zu dem Ergebnis, dass hohe Sammelraten vor allem durch leichte Zugänglichkeit zu vielen Sammelstellen sowie breite und intensive Informationen der Benutzer erreicht werden.

Iyer und Kashyap (2007) untersuchten den Einfluss, den das Setzen von Anreizen und die Bereitstellung von Informationen auf das Entsorgungsverhalten von Glas und Papier haben. Die Untersuchungen fanden über einen Zeitraum von fünf Monaten auf dem Campus einer großen US-amerikanischen Universität statt. Dabei wurden zwei Cluster von Studentenwohnheimen, die sich an verschiedenen Orten auf den Campus befanden, gebildet. Den Bewohner der Wohnheime des einen Clusters wurde mitgeteilt, dass für die Bewohner des Wohnheims mit der größten Sammelmenge von Papier und Glas in einem Zeitraum von vier Monaten eine Party organisiert wird („Incentive Site“). Hierbei handelt es sich um einen nicht-monetären Anreiz auf Gruppenebene. Die Bewohner des anderen Wohnheimclusters nahmen im selben Zeitraum an einem Informationsprogramm teil. Dieses beinhaltete Vorführungen über die richtige Art und Weise der Entsorgung sowie eine wöchentliche Zusendung von Informationsmaterialien über das Recycling von Papier und Glas („Information Site“).

Der Einfluss der beiden Experimentalbedingungen wurde gemessen, indem die Menge der entsorgten Materialien pro Student mit den Daten vor Beginn des Experiments verglichen wurde. Diese Menge wurde zwei Mal während des Versuchs gemessen und ein-

[32] Dies beinhaltet Stahl, Konservendosen, Spraydosen, Glasflaschen und Plastik.

mal nach Beendigung der beiden Experimentalbedingungen. Außerdem wurde der Anteil an falsch entsorgten Materialien erfasst. Sowohl in absoluten Zahlen als auch in Relation zur Messung vor Beginn des Experiments wurden an der Information Site größere Mengen an Glas und Papier entsorgt als an der Incentive Site. Bei beiden Experimentalgruppen nahm nach Beendigung des Versuchs die entsorgte Menge wieder ab, lag aber noch deutlich über den Werten vor Beginn des Versuchs. Über den gesamten Versuchszeitraum nahm der Anteil falsch entsorgter Materialien in beiden Experimentalgruppen leicht zu. Ein weiteres Ergebnis dieser Studie war, dass Anreize und Informationen bei verschiedenen Materialien zu unterschiedlichen Veränderungen in der Sammelmenge führen. Während die entsorgte Menge Glas in der Studie nur leicht anstieg, verdreifachte sich die Menge an entsorgtem Papier. Ein Grund dafür könnte sein, dass Papier länger zu Hause gesammelt wird als Glas, welches eher direkt in der Restmülltonne entsorgt wird.

Iyer und Kashyap (2007) untersuchten dabei nur einen Anreiz auf Gruppenebene, der eine starke soziale Komponente enthält. Gegebenenfalls wirken monetäre Anreize auf individueller Ebene ganz anders, vor allem weil sie eine genaue Abwägung zwischen Kosten und Nutzen der Verhaltensänderung ermöglichen. Da der entstehende Aufwand durch die Fahrt zu einem Wertstoffhof kaum durch monetäre Anreize aufgewogen werden kann, scheint das Setzen dieser Anreize allerdings häufig nicht sinnvoll zu sein.

Shaw und Maynard (2008) stellten bei einer schriftlichen Umfrage in England fest, dass Verbraucher grundsätzlich Anreize auf Gruppenebene bevorzugen. Bei dieser Studie wurden die Teilnehmenden gebeten, verschiedene Anreize daraufhin zu bewerten, ob sich dadurch ihr Entsorgungsverhalten verändern würde. Die Teilnehmer schätzten die Einrichtung von zusätzlichen Services auf kommunaler Ebene, beispielsweise eine verbesserte Straßenreinigung, als wirksamsten Anreiz ein. Außerdem stimmten 60 % der Befragten dem Statement zu, dass sie mehr Müll trennen würden, wenn ihre Kommune direkt davon profitieren würde. Dagegen gaben nur etwa 20 % an, dass sie mehr Aufwand in Mülltrennung investieren würden, wenn sie dafür Geld bekämen[33]. Auf die freie Frage, was der Bezirk verändern könnte, um das Sammelverhalten zu fördern, gaben über die Hälfte der Befragten an, dass eine Vereinfachung des Erfassungsprozesses zu den größten Veränderungen führen würde. Dahinter folgen mit jeweils etwa 20 % die Bereitstellung von Informationen sowie das Setzen von finanziellen Anreizen.

Shaw und Maynard weisen auch darauf hin, dass die Befragten direkte Investitionen in die Infrastruktur der Erfassungspunkte (zum Beispiel deren Anzahl) als wirksamstes Instrument bewerten, um die Mülltrennung im untersuchten Bezirk voranzutreiben. Allerdings muss beachtet werden, dass in dieser Befragung Einstellungen gemessen wurden und nicht tatsächliches Verhalten.

Anders könnte sich die Situation bei einem Pfandsystem darstellen. Das liegt daran, dass Menschen üblicherweise Gewinne und Verluste auf unterschiedliche Art und Weise mental verarbeiten. Der Verlust von 10 € (Pfandzahlung) führt nach Kahneman und Tversky (1979) zu einem größerem negativen Nutzen als der Gewinn von 10 € (finanzieller Anreiz) zu einem positiven Nutzen führt.

[33] In dieser Studie wurde der Geldbetrag nicht näher definiert.

Hornik et al. (1995) führten 1995 eine Metaanalyse durch, um den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Entsorgungsentscheidung zu quantifizieren. In ihrer Analyse berücksichtigten sie 67 Studien, die zwischen 1968 und 1994 durchgeführt wurden. Dabei wurden auch unveröffentlichte Studien soweit möglich berücksichtigt, weil tendenziell signifikante Ergebnisse eher publiziert werden als insignifikante. Zwischen monetären Anreizen und Mülltrennung wurde dabei eine mittlere Korrelation von 0,327 festgestellt. Laut der Metaanalyse haben Bequemlichkeitsvariablen, wie die Nähe der Sammelcontainer und die Häufigkeit der Abholungen einen geringeren Effekt (mittlere Korrelationen von 0,186 und 0,29). Allerdings wurden im untersuchten Zeitraum lediglich fünf Studien durchgeführt, die Bequemlichkeit untersuchten, während sich fast zwanzig mit finanziellen Anreizen beschäftigten. Grundsätzlich scheinen aber interne Faktoren wie Wissen oder eine internale Kontrollüberzeugung einen größeren Effekt zu haben als externe Faktoren. Außerdem wurde in der Metaanalyse festgestellt, dass beobachtetes Verhalten höher mit den untersuchten Prädiktoren korreliert als berichtetes Verhalten.

Allgemein kann festgestellt werden, dass es keine eindeutige Definition von „Bequemlichkeit“ (engl. convenience) bei der Entsorgungsentscheidung gibt. Dieser Begriff wird in vielen Studien verwendet, allerdings meist ohne eindeutig definiert zu werden. Bequemlichkeit kann beinhalten:

- Entfernung des Wertstoffhofs,
- Erreichbarkeit des Wertstoffhofs (auch mit öffentlichen Verkehrsmittel),
- Anzahl der angenommenen Materialien,
- Sortieraufwand,
- Öffnungszeiten,
- Verknüpfungsmöglichkeiten mit anderen Aktivitäten (z. B. Wertstoffhof ist in der Nähe von Einkaufs- oder Freizeitmöglichkeiten).

Einige Facetten von Bequemlichkeit sind üblicherweise negativ miteinander korreliert. So würde die Einrichtung von Sammelcontainern zu einer kürzeren durchschnittlichen Entfernung der Entsorgungspunkte führen, allerdings würden an diesen Entsorgungspunkten wahrscheinlich auch weniger unterschiedliche Materialien und Produkte entgegengenommen werden.

Obwohl sich die meisten der vorgestellten Studien nicht auf EAG beziehen, sind die beschriebenen Ausgangssituationen vergleichbar mit der Situation bei EAG in Deutschland. Allerdings gibt es auch einige wichtige Unterschiede. So fallen Materialien wie Altpapier oder Altglas deutlich häufiger an als EAG. Außerdem ist bei diesen Materialien kaum mit einer Hortung in Schubladen zu Hause zu rechnen, zum einen, weil die Materialien keinen Wiederverkaufswert oder emotionalen Wert haben und zum anderen, weil sie in so großer Menge anfallen, dass eine längerfristige Lagerung allein aus Platzgründen nur selten möglich ist.

Die Ergebnisse des Literaturüberblicks zeigen, dass eine kürzere Entfernung des Entsorgungspunkts zu häufigeren Besuchen, größeren Mengen an gesammelten Materialien und zu einer höheren Anzahl verschiedener gesammelter Materialien führt. Der Aufwand des Entsorgungsvorgangs, zum Beispiel die Zeit, die am Entsorgungspunkt investiert werden muss, hat ebenfalls einen Einfluss. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese

Faktoren auch starken Einfluss auf das Entsorgungsverhalten bei EAG haben. Dabei besteht zusätzlich die Herausforderung, Verbraucher daran zu gewöhnen, kleine EAG zeitig zu entsorgen. Dies könnte durch eine sehr gute Sichtbarkeit der Sammelpunkte, die idealerweise auf Wegen liegen, die im Alltag der Verbraucher sowieso zurückgelegt werden, geschehen, weil Verbraucher diese häufiger sehen und dadurch häufiger mit der Möglichkeit konfrontiert werden, kleine EAG zu entsorgen.

4.2 Status quo der zeitlichen Verfügbarkeit des Erfassungssystems örE

Die Sammlung von EAG aus privaten Haushalten auf den Recyclinghöfen (auch Wertstoffhöfe genannt) der örE stellte zum Untersuchungszeitpunkt den regulären Erfassungsweg dar.

Zur Evaluierung des Status quo zur Sammlung der RePro-Geräte wurden Öffnungszeiten von Annahmestellen für Abfälle aus privaten Haushaltungen recherchiert.

Insgesamt wurden 3.213 Datensätze recherchiert. Es stellte sich heraus, dass die Annahmestellen oftmals nicht jeden Tag geöffnet sind. Die Öffnungszeiten variieren oft innerhalb einer Woche, innerhalb eines Monats und zwischen den Jahreszeiten oder Jahreshälften bzw. -quartalen, wie die folgenden Beispiele für Angaben über Öffnungszeiten bei verschiedenen örE zeigen:

- gerade KW: Mi 12.00 - 18.00, Sa 9.00 - 13.00; ungerade KW: Di, Fr 12.00 - 18.00, Do 9.00 - 15.00,
- Dez - Mär: Mo- Fr 9.00 - 17.00, Apr - Nov: Mo- Fr 10.00 - 18.00,
- Apr - Okt zusätzlich in den geraden Kalenderwochen: Do 10.00 - 13.15 und 14.00 - 18.00,
- Gerade KW: Sa 8.00 - 15.00,Apr - Okt zusätzlich: Mi 10.00 - 13.15 und 14.00 - 18.00,
- Am 1. und 3. Sa im Monat 8.00 - 13.00,
- Öffnungszeiten telefonisch zu erfragen,
- 14-täglich Fr 13.00 - 16.00 14-täglich Sa 10.00 - 12.00, (jedes 1. und 3. Wochenende),
- jeden 2. Donnerstag im Monat 16.00 - 18.00 Uhr,
- Sa 8.15 - 12.00 (nach Wochenfeiertagen),
- Sommermonate: Fr 16.00 - 17.00, Sa 9.00 - 12.00; Wintermonate: Fr 15.00 - 16.00, Sa 9.00 - 12.00,
- Nur geöffnet März bis November,
- Mi für Privatanlieferer - 19.00 (ab 15.30 nur Annahme Kleinmengen),
- Von Dezember bis Februar geschlossen,
- Annahmestelle in der Winterzeit geschlossen,
- Geöffnet vom 2. Apr. bis 26. Nov.,
- jedes 2. und 4. zusammenhängende Wochenende,

Um die heterogenen Öffnungszeiten sinnvoll auswerten zu können, wurde ein Bezugsmonat identifiziert, für den die Öffnungszeiten dargestellt wurden. Im Sommerhalbjahr sind einige Annahmestellen zusätzlich geöffnet bzw. länger geöffnet. Dies geschieht teilweise vor dem Hintergrund der Anlieferung von Grün-/Gartenabfällen. Für die Auswertung wurde der November 2012 als Bezugsmonat ausgewählt. In durchgeführten Stich-

proben zeigte sich, dass die Annahmezeiten für EAG relativ wenig über das Jahr variierten. Durch die Wahl eines Monats in den Wintermonaten wurden die Ergebnisse durch spezifische Annahmestellen für Grünabfälle nicht verfälscht. Dezember und Januar waren aufgrund der Feiertage bzw. des Jahreswechsels keine geeigneten Monate.

In einigen Fällen wurden Annahmestellen identifiziert, konnten jedoch nicht in die Auswertung integriert werden, da die Angaben zu den Öffnungszeiten fehlten oder nicht kompatibel waren (75 Annahmestellen entsprechend 2 %). Der Fokus lag entsprechend der Zielsetzung des Projektes RePro auf Abfällen aus privaten Haushaltungen. Eine Differenzierung zwischen kommunalen, privatwirtschaftlichen oder rein privaten Annahmestellen für EAG konnte aufgrund des hierfür sehr hohen Zeitaufwandes nicht durchgeführt werden.

Die Ergebnisse für den Referenzmonat sind in Abbildung 22 dargestellt. Zu grün schraffierten Uhrzeiten ist ein relativ hoher Anteil der Annahmestellen geöffnet, zu rot schraffierten Uhrzeiten ist ein geringer Anteil der Annahmestellen geöffnet.

Abbildung 22: Überblicksdarstellung der Verteilung der Öffnungszeiten (Angaben in % der Annahmestellen; Gesamtzahl: 3.213)

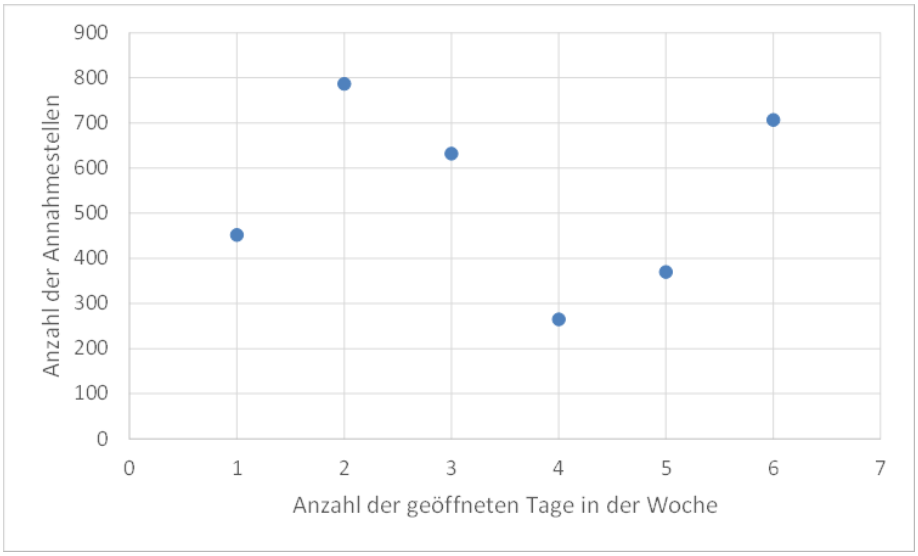
		Tageszeiten															
Tag		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
2	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
3	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
4	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
5	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
6	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
7	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
9	DI	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
10	MI	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
11	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
12	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
13	SA	0	2	26	74	86	81	33	16	9	5	1	0	0	0	0	0
14	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
16	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
17	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0
18	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	35	36	26	14	3	1	0	0
19	FR	0	5	21	30	34	33	26	44	54	59	42	17	2	1	0	0
20	SA	0	2	24	71	83	78	32	15	8	4	1	0	0	0	0	0
21	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
23	DI	0	5	20	29	32	32	25	34	39	40	29	14	3	1	0	0
24	MI	0	5	19	28	33	32	24	36	42	45	32	17	4	1	0	0
25	DO	0	4	19	28	32	31	24	32	36	36	26	14	3	1	0	0
26	FR	0	5	21	30	35	34	27	44	55	60	43	18	2	1	0	0
27	SA	0	2	27	76	88	83	34	16	9	5	1	0	0	0	0	0
28	SO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	MO	0	5	18	25	28	28	22	28	31	30	19	9	3	1	0	0
30	DI	0	5	20	28	32	32	24	33	38	39	28	14	3	1	0	0
31	MI	0	5	19	28	32	32	24	35	42	45	32	17	3	1	0	0

Anmerkungen zur Abbildung:
Woche 2 enthält die 14-täglich wiederkehrenden Termine,
Woche 4 enthält die 14-täglich wiederkehrenden Termine und die monatlich wiederkehrenden Termine
Uhrzeit: „7“ heißt „von 7 bis 8 Uhr“,
In die Uhrzeit z. B. „12“ können auch Öffnungszeiten bis z. B. „12:15 Uhr“ fallen

Quelle: eigene Darstellung

Die durchschnittliche Öffnungszeit einer Annahmestelle liegt in dem untersuchten Cluster bei 19,1 h/Woche. Die folgende Abbildung zeigt die Zahl der Annahmestellen je geöffneter Tage (keine Doppelzählung).

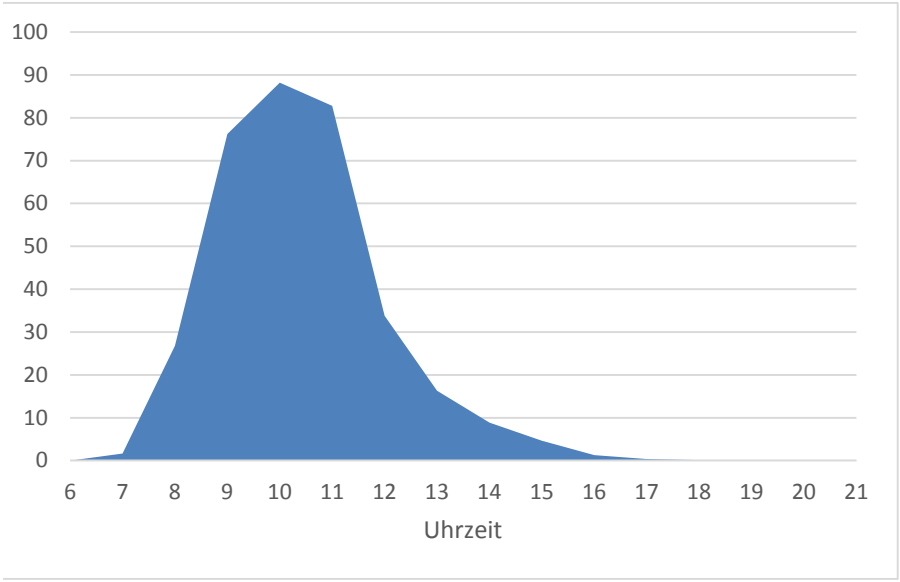
Abbildung 23: Anzahl der Annahmestellen je Zahl geöffneter Tage



Quelle: eigene Darstellung

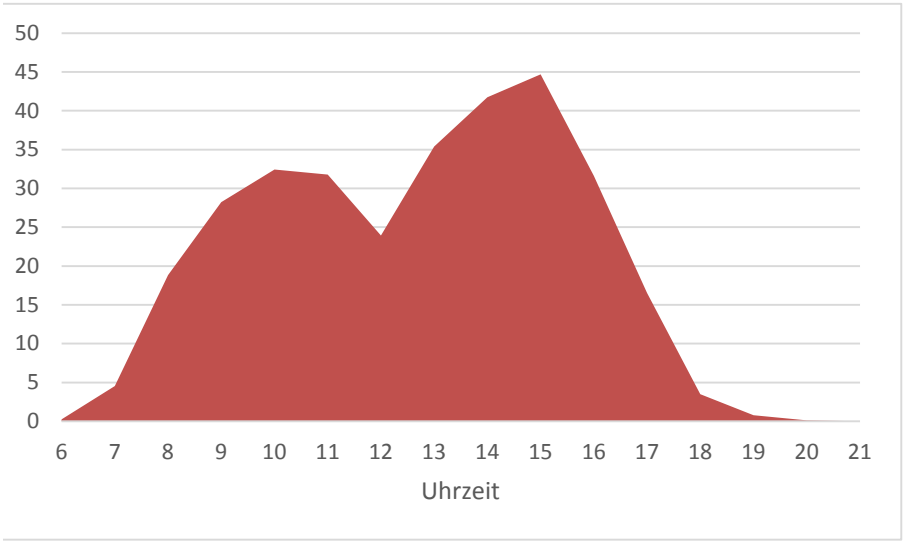
An Samstagen hat der Großteil der Annahmestellen (über 80 %) geöffnet, siehe Abbildung 24, was eine gute Erreichbarkeit für wochentags beschäftigte Verbraucherinnen und Verbraucher ermöglicht. Der Schwerpunkt liegt auf dem Vormittag, während zum Nachmittag hin die Öffnungsrate stark abnimmt. Am einem exemplarischen Mittwoch werden die Öffnungsraten der Samstagvormittage nicht erreicht: am Nachmittag um 15 Uhr haben durchschnittlich 45 % der Sammelstellen geöffnet, siehe Abbildung 25.

Abbildung 24: Anteil geöffneter Annahmestellen (exemplarischer Samstag,) in %



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 25: Anteil geöffneter Annahmestellen (exemplarische Mittwoch) in %



Quelle: eigene Darstellung

Als Fazit lässt sich aus den Erhebungen ableiten, dass das bestehende Sammelsystem bei den Wertstoffhöfen der örE für Elektroaltgeräte wie die RePro-Geräte eine vergleichs-

weise geringe zeitliche Verfügbarkeit hat (durchschnittlich 19 h/Woche) und die zeitliche Lage der Abgabemöglichkeiten für viele Verbraucherinnen und Verbraucher nur eingeschränkt nutzbar sein ist[34].

4.3 Sammlung durch den Handel

4.3.1 Status quo der Sammlung durch den Handel in Deutschland

In Deutschland bestand zur Zeit des alten ElektroG (vor 2015) keine Verpflichtung für den Handel, Elektroaltgeräte von den Kunden zurücknehmen.

Einer Verpflichtung im Rahmen der Novellierung des ElektroG standen die Handelsverbände sehr skeptisch gegenüber und befürchteten Belastungen für den Handel. So wurden Platzmangel im Zuge der Rückgabe der EAG erwartet, finanzielle Einbußen, unzumutbarer Zeitaufwand für das Personal und unhygienische Zustände in den Geschäften als Argumente gegen eine Rücknahmeverpflichtung des Handels angeführt und die Unpraktikabilität und schwierige Vermittelbarkeit des Systems für Verbraucher betont (z. B. VKU 2014; HDE 2014). Eine signifikante Steigerung der Mengen wird vonseiten der Verbände bei einer generell geltenden 1:1-Rücknahmeverpflichtung[35] nicht gesehen, da es nach der Ansicht des Handelsverbands Deutschland HDE schon heute eine ausreichende Flächendeckung mit Sammelstellen gebe. Auch wurde davon ausgegangen, dass eine 1:1-Rücknahmeverpflichtung in der Praxis eine 0:1-Verpflichtung[36] bedeute, da es den Kunden schwer vermittelbar sei, in welchen Geschäften Geräte abgegeben werden können oder nicht. Zudem wurde darauf verwiesen, dass der Handel bereits jetzt auf freiwilliger Basis EAG zurücknehme und eine rechtliche Verpflichtung daher nicht nötig sei. Dieses letzte Argument war aufgrund einer schwachen Datenlage schwierig zu überprüfen, für die Beantwortung der Frage, ob eine Verpflichtung sinnvoll ist oder nicht, jedoch sehr relevant.

Der Handelsverband Deutschland (HDE) hat im Jahr 2014 in einer Online-Umfrage 580 Unternehmen aus verschiedenen Branchen zu seinerzeitigen Rücknahmeaktivitäten befragt. Daraus geht hervor, dass zu dieser Zeit bei gut 60 % der an der Umfrage teilnehmenden Unternehmen eine Rückgabe von EAG möglich war – in ca. 40 % der Einzelgeschäfte mit einer Verkaufsfläche < 400 m² und 50 % der Filialgeschäfte mit einer Verkaufsfläche < 400 m² war sogar eine Rückgabe 0:1-Rückgabe möglich. So gaben die Geschäfte auch an, dass sie im abgelaufenen Jahr (vermutlich 2013) insgesamt 4.852 Tonnen EAG zurückgenommen hätten. Davon entfielen gut 93 % alleine auf Filialbetriebe mit einer Verkaufsfläche > 400 m². Von den insgesamt 333.378 abgegebenen Geräten handele es sich im Schnitt bei 46 % um Elektrokleingeräte – wobei der überwiegende

[34] Als Benchmark für die zeitliche Verfügbarkeit kann z. B. die WEEE-RL des Jahres 2002 herangezogen werden, die die europarechtliche Grundlage des bestehenden ElektroG darstellt. In Artikel 5.2.b wird die Rückgabe beim Handel (Zug um Zug) benannt und andere Sammelsysteme genutzt werden können, wenn dies „die Rückgabe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte für den Endnutzer hierdurch nicht erschwert“,

[35] Die 1:1-Rücknahme bezeichnet die Rücknahme eines Altgerätes, das im Wesentlichen die gleichen Funktionen erfüllt wie ein neu gekauftes Gerät. In der deutschen Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie in Form des ElektroG2 ist auch die 1:1-Rücknahme durch den Handel auf Händler mit einer Verkaufsfläche für Elektrogeräte > 400 m² beschränkt.

[36] Die 0:1 Rücknahme bezeichnet die Rücknahme von Altgeräten ohne einer Verpflichtung zum Neukauf. Die 0:1 Rücknahme ist nach WEEE-II-Richtlinie und ElektroG2 auf Vertreiber mit einer Verkaufsfläche für Elektrogeräte > 400 m² beschränkt.

Teil davon in Filialbetrieben mit < 400 m² Verkaufsfläche gesammelt wurde. Die Datenlage zu den gesammelten Mengen ist dabei jedoch beschränkt aussagekräftig, da nach Aussage des HDE (persönliche Kommunikation mit HDE 2014) Händler in der realen Praxis zu jenem Zeitpunkt keine genaue Kontrolle über die Sammelmengen dokumentierten.

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) kam in einer eigenen Online-Umfrage unter Händlern in NRW zu ähnlichen Ergebnissen. In der Befragung wurden Sammelaktivitäten zu den SG 3 & SG 4(Gasentladungslampen) von Vertreibern mit verschiedenen Vertriebswegen abgefragt. Dabei gab gut die Hälfte der 45 Befragten an, mindestens eine der betrachteten Sammelgruppen zurückzunehmen. Die Bereitschaft zur Rücknahme der SG 4 war dabei deutlich höher als die bei der SG 3. Die Rücknahme erfolgte bei allen Befragten jedoch unter der Prämisse, dass die Geräte auch selber vertrieben werden. Einen zukünftigen Aufbau von Rücknahmesystemen plante keiner der Befragten. Nur bei zwei von 17 Geschäften sei eine Rücknahme an einen gleichzeitigen Neukauf eines Gerätes gebunden. Auch die Frage der Kostenerhebung bei der Rückgabe wurde nur von zwei der 18 Antwortenden dahingehend beantwortet, dass sie Entgelt im Falle der Abholung der Altgeräte der SG 3 aus den Haushalten der Verbraucher erheben. Die Rückgabe im Geschäft war (wie im ElektroG vorgeschrieben) bei allen Befragten kostenlos. Letztlich kommt der Bericht zu dem Schluss, dass sich die Anzahl der Vertreiber und damit die Zahl der Sammelstellen, die eine freiwillige Rücknahme praktizieren, ohne „zusätzliche (gesetzliche) Vorgaben“ (LANUV 2014) nicht signifikant erhöhen werde und die seinerzeitige Rolle des Einzelhandels bei der Rücknahme von EAG „vermutlich sehr gering“ sei. Allerdings bestehe ein unzureichendes Monitoring hinsichtlich der Zuordnung der erfassten Mengen zu spezifischen Rücknahmesystemen. Für den Fall einer Rücknahmeverpflichtung für den Handel wurde auf die besondere Rolle des Internethandels hingewiesen, der unter dem alten ElektroG wenige Rücknahmeaktivitäten auf freiwilliger Basis vollzog und aufgrund der Wettbewerbsgleichheit in irgendeiner Form in die Verpflichtung mit eingebunden werden sollte, (LANUV 2014) wie durch die Novelle des ElektroG 2015 geschehen.

4.3.2 Die Rolle des Handels in Sammelsystemen anderer europäischer bzw. EU-Länder

In anderen Ländern der EU bzw. Europas ist die Rücknahme von RePro-EAG durch den Handel entweder durch freiwillige Maßnahmen oder durch eine Verpflichtung bereits in den Sammelstrukturen verankert. An dieser Stelle werden die Situationen einiger Länder exemplarisch vorgestellt.

4.3.2.1 Belgien

In Belgien stehen die Hersteller in der Verantwortung, EAG zu sammeln und zu verarbeiten. Auf nationaler Ebene wurde von den Herstellern und Importeuren von Elektro- und Elektronikgeräten daher mit Recupel eine Producer Responsibility Organisation (PRO) gegründet, denen sich Hersteller anschließen und damit die Organisation der Rücknahme und Behandlung gegen finanzielle Beiträge abtreten können. Es ist auch möglich, individuelle Rücknahmesysteme zu gründen.

Für den Handel besteht eine 1:1-Rücknahmepflicht bei Verkauf eines gleichwertigen Geräts. In Flandern ist eine 0:1-Rücknahme vorgesehen, sofern im öffentlichen Raum keine

Rückgabemöglichkeiten bestehen. Die gesammelten Altgeräte können entweder bei Wertstoffhöfen abgegeben werden oder das Geschäft lässt sich bei Recupel als Abholstelle registrieren, sofern es regelmäßig eine gewisse Menge an Geräten sammelt. Unter Umständen erhalten die Geschäfte dafür eine finanzielle Vergütung (LANUV 2014). Die Kosten für die Rücknahme sind bei Verkauf eines neues Gerätes mit inbegriffen.

Belgien erreichte eine Sammelmenge von 10,41 kg/Einwohner EAG im Jahr 2013 (Recupel 2014). Recupel gibt die Sammelstellen im Handel dabei mit 4.407 an, die Anzahl der Wertstoffhöfe mit 553 und die der Gebrauchtwarenläden, welche auch Elektroaltgeräte annehmen, mit 22. Straßensammlungen spielen keine große Rolle. Der beim Handel gesammelte Anteil an EAG aus Privathaushalten macht dabei 23.717 Tonnen, bzw. 21 % der Gesamtsammelmenge aus, was äquivalent mit einer Pro-Kopf-Menge von 2,2 kg/E*a ist (OVAM 2014). Die größten Mengen (2012: 60 %) werden bei den Wertstoffhöfen gesammelt, was auch auf die hohe Dichte von nur 20.000 Einwohner pro Hof zurückzuführen ist. Zudem haben Recyclinghöfe in Brüssel auch sonntags geöffnet (LANUV 2014).

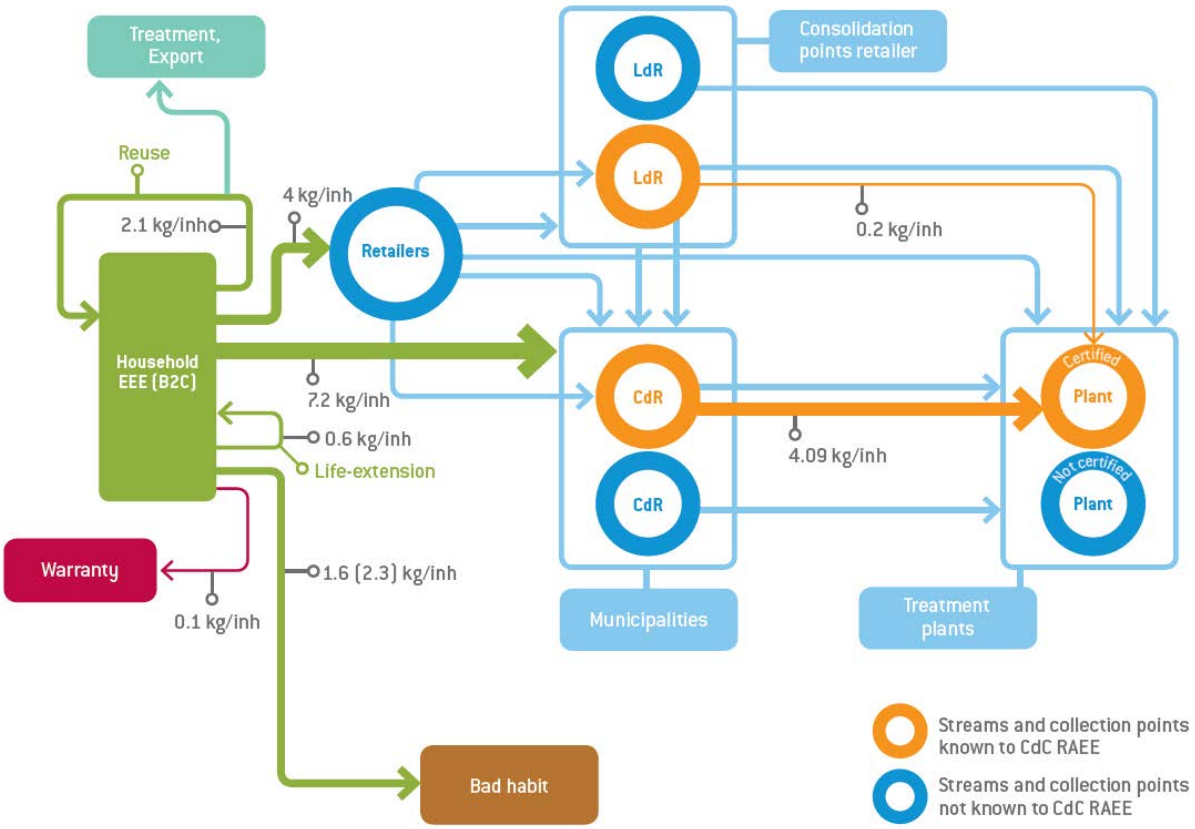
4.3.2.2 Italien

In Italien sind die Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten finanziell für Sammlung, Transport und Behandlung der Altgeräte verantwortlich. Unterschieden wird zwischen historischen Haushaltsgeräten (auf den Markt gebracht vor 2009) und Geräten, die danach verkauft wurden. Für die Sammlung und Behandlung von ersteren müssen die Hersteller PROs beitreten, die die Entsorgung übernehmen und die Kosten anteilig am Marktanteil der Hersteller abrechnen. Für die neueren Geräte besteht eine individuelle Herstellerverantwortung. Um dieser gerecht zu werden, können Hersteller aber auch einer PRO beitreten, von denen es in Italien derzeit 16 gibt (einige davon nur auf bestimmte Produktgruppen spezialisiert) (CDC RAEE 2014). Die größten Mengen sammeln ECODOM, ERP Italia, Raecycle, Remedia und Ecolight, die im Jahr 2013 knapp 90 % der aus Haushalten gesammelten Menge von 225.931 Tonnen übernahmen (CDC RAEE 2014a). Dies entspricht einer Pro-Kopf-Sammelmenge von 3,8 kg/E*a.

Seit 2010 müssen Händler Altgeräte mit einer 1:1-Rücknahmepflicht zurücknehmen. Die gesammelten Geräte können sie entweder zu Wertstoffhöfen bringen oder von einer PRO abholen lassen. Dafür können Händler Verträge mit der Koordinierungsstelle CDC RAEE schließen und Sammelpunkte einrichten, wo die EAG von den PRO übernommen werden. Verlässliche Daten zu den durch die Händlersammlung erfassten Mengen liegen nicht vor.

In einer Studie der UN University wurden über Erhebungen und Schätzungen Mengenströme von Altgeräten bestimmt (Magalini et al. 2012). Danach lag die im Jahr 2011 auf den Markt gebrachte Haushaltselektrogerätemenge bei 18,3 kg/Einwohner. Das durchschnittliche jährliche Inverkehrbringen von Elektro- und Elektronikgeräten in den drei Vorjahren (2008-2010) betrug 18,5 kg/Einwohner. Es wurde geschätzt, dass 4kg/Einwohner im Jahr 2011 an den Handel übergeben wurden und 7,2 kg/Einwohner an die kommunale Sammlung. Vom Handel wurden in diesem Jahr 0,2 kg/Einwohner an zertifizierte Behandlungseinrichtungen gegeben und von den kommunalen Sammelstellen 4,1 kg/Einwohner. Die restlichen Altgeräteströme verblieben in anderen Pfaden als den zertifizierten Behandlungseinrichtungen ((Magalini et al. 2012) (siehe auch Abbildung 26).

Abbildung 26: Elektroaltgeräteströme in Italien 2011



Quelle: Magalini et al. (2012)

Magalini et al. (2012) geben an, dass im Jahr 2012 100 Sammelstellen bestanden.

4.3.2.3 Niederlande

In den Niederlanden besteht für Händler die Verpflichtung zur 1:1-Rücknahme. Die Verpflichtung einer 0:1-Rücknahme für kleine EAG (äußere Maße ≤ 25 cm) im Geschäft oder der unmittelbaren Umgebung für Geschäfte mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte von ≥ 400 m² besteht, allerdings soll diese aufgehoben werden, wenn Bewertungen ergeben, dass bestehende Sammelsysteme mindestens genauso effektiv und für die Öffentlichkeit zugänglich sind.

Das niederländische Sammelsystem besteht hauptsächlich aus Wertstoffhöfen, Sammelstellen beim Handel und gemeinnütziger Sammlung zur Wiederverwendung der Altgeräte. Gerade in Städten kommt es zudem häufig zu Haussammlungen, auch durch Metallhändler. In den Niederlanden gibt es mit Wecycle gegenwärtig eine große PRO, die die größten Mengen an gesammelten EAG übernimmt und ca. 1.600 Produzenten vertritt. Dabei sammelt Wecycle hauptsächlich über zwei Kanäle: Der Großteil der Mengen fällt bei kommunalen Wertstoffhöfen an, mit denen Wecycle Verträge abgeschlossen hat. Der übrige Teil wird über Sammelstellen beim Handel gesammelt. Hier wählen Händler entweder die Möglichkeit, die Rücknahme selber zu organisieren und die gesammelten Mengen an einem Verdichtungspunkt zu bündeln, von wo Wecycle die Altgeräte übernimmt (ca. 60 in den Niederlanden), oder Wecycle holt die abgegebenen Altgeräte direkt

bei den Geschäften ab, wobei es sich dabei oft um einzelne Altgeräte handelt (Tilstra 2014). Wecycle sammelt in ca. 4.500 Geschäften, von denen 2.500 Geschäfte eine Abholorder an Wecycle senden, wenn sie EAG zur Abholung bereit stehen haben. Bei 2.000 Geschäften wird auch ohne Abholorder von einem beauftragten Unternehmen abgeholt und die EAG-Behälter regelmäßig geleert, so dass die Geschäfte keinen Mehraufwand haben. Diese Praxis bezieht sich hauptsächlich auf Leuchtmittel (und Batterien, die nicht Teil von RePro sind). Die Geschäfte erhalten für ihren Aufwand eine Kompensation von Wecycle.

Im Jahr 2013 hat Wecycle insgesamt 114.700 t EAG übernommen oder gemeldet. 75.000 t (66 %) wurden auf Wertstoffhöfen gesammelt, 39.000 t bzw. 34 % stammen aus der Rückgabe in Geschäften (Wecycle 2014). Pro Kopf bedeutet das eine Menge von 6,8 kg/a, von denen 2,3 kg/a in Geschäften gesammelt wurden. Seit 2013 gibt es mit WEEE NL eine weitere PRO, die aber (Stand Frühjahr 2015) noch keine Statistiken zu gesammelten Mengen veröffentlicht hat.

4.3.2.4 Dänemark

In Dänemark bestand vor der Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie[37] keine Verpflichtung für den Handel, EAG von Privatverbrauchern zurückzunehmen, ihnen stand es jedoch offen, dies freiwillig zu tun. Wenn Geschäfte EAG annehmen, können sie diese entweder bei kommunalen Wertstoffhöfen abgeben oder, wenn die Mengen zu groß sind, eine Vereinbarung mit einer von den Herstellern der Geräte finanzierten PRO treffen. Von diesen gibt es in Dänemark mit Elretur, ERP Denmark, LWF und Rene derzeit vier, wobei LWF lediglich Leuchtmittel übernimmt. Elretur gab an, dass sie sehr geringe Mengen von „privaten“ Sammelstellen übernehmen (ca. 2.000 Tonnen im Jahr 2013), zu denen auch Geschäfte gehören (Elretur 2014). Die hohe Sammelquote von 12,7 kg/E*a führt Elretur darauf zurück, dass die kommunalen Rückgabemöglichkeiten in direkter Nähe der Verbraucher zu finden sind und die Bürger über die Jahrzehnte gelernt haben, Gebrauch von diesem Service zu machen. In Dänemark gab es im Jahr 2013 397 kommunale Wertstoffhöfe (DPA 2013), was einem Wertstoffhof pro 14.000 Einwohnern entspricht.

4.3.2.5 Österreich

In Österreich ist der Handel durch die 2014 novellierte Elektrogeräteverordnung (EAG-VO) verpflichtet, EAG auf 1:1-Basis zurückzunehmen, wenn die Verbraucher ein neues, gleichwertiges Produkt kaufen. Ausnahmen sind möglich, wenn die Verkaufsfläche des Geschäfts weniger als 150 m^2 beträgt und die Kunden darüber informiert werden (§ 5 Abs. 2). Es ist nicht möglich, die Verpflichtung an eine PRO zu übertragen. Händler haben die Möglichkeit, die abgegebenen EAG auf eigene Kosten zu einer kommunalen Sammelstelle zu transportieren und dort unentgeltlich abzugeben. Der Versandhandel kann seiner 1:1-Rücknahmeverpflichtung nachkommen, indem er mindestens zwei öffentlich zugängliche Rückgabestellen für EAG je politischen Bezirk (ca. 200) einrichtet. Diese Stellen und deren Öffnungszeiten müssen insbesondere in Werbematerialien und auf seiner Internetseite bekannt gegeben werden (§ 5 Abs. 3). Für die Abholkoordinierung an den Sammelstellen der Kommunen und Hersteller ist die Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH (EAK Austria) verantwortlich. Im Jahr 2013 wurden in Öster-

[37] Richtlinie 2012/19/EU, welche die alte WEEE-Richtlinie (2002/95/EC) 2012 abgelöst hat.

reich 76.005 Tonnen EAG eingesammelt, was einer Pro-Kopf-Menge von 9 kg/E*a entspricht (EAK Austria 2014). Über die Höhe des Anteils des Handels liegen keine Zahlen vor.

4.3.2.6 Frankreich

Produzenten von Elektro- und Elektronikgeräten in Frankreich haben die Wahl, ein individuelles Rücknahmesystem zu gründen, um ihrer Rücknahmeverpflichtung für Haushaltsgeräte gerecht zu werden, oder einem der gegenwärtig vier bestehenden PROs beizutreten. Bis zum Jahr 2012 war kein individuelles System angemeldet worden (ADEME 2014). Die vier bestehenden PROs sind Ecosystèmes, European Recycling Platform (ERP), Ecologic und Recyclum (speziell für Leuchtmittel). Im Jahr 2006 gründeten sie die Vereinigung OCAD3E, die sich um die Koordinierung zwischen den PROs und den kommunalen Behörden kümmert.

EAG aus Haushalten werden in Frankreich über drei verschiedene Kanäle gesammelt. Kommunen unterhalten Wertstoffhöfe, die für die Sammlung von OCAD3E finanziell entschädigt werden. 2012 bestanden 4.000 Wertstoffhöfe in Frankreich, zu denen 62 Millionen Menschen Zugang hatten, d. h. 15.500 Einwohner pro Wertstoffhof. Des Weiteren führen Non-Profit-Organisationen Sammlungen durch, die das Hauptziel der Wiederverwendung von Altgeräten haben. Zum Dritten haben sich Sammelstellen im Handel etabliert.

In Frankreich besteht eine 1:1-Verpflichtung für Händler zur kostenfreien Rücknahme von Altgeräten bei Neukauf eines gleichwertigen Geräts. Diese Verpflichtung gilt auch für den Online-Handel. Bei Lieferung eines neuen Geräts sind die Lieferanten bzw. Installateure für die Überführung zu den Händlern verantwortlich. Seit der Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie in französisches Recht im August 2014 gilt auch die Pflicht zur 0:1-Rücknahme von kleinen EAG (äußere Maße ≤25 cm) bei Geschäften mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte von ≥400 m². Im Jahr 2012 waren insgesamt 21.928 Sammelstellen bei Händlern registriert und 19.808 Abholstellen für die Rücknahmesysteme gemeldet, von denen jedoch nur 8.855 aktiv waren (d. h. die im Jahr mindestens eine Meldung zur Abholung von EAG gemacht haben) (ADEME 2013). Der Handel spielt bei der Sammlung von EAG in Frankreich eine große Rolle. So wurden 2012 insgesamt 26 % der insgesamt 452.732 Tonnen über die PROs gesammelter Haushalts-EAG über den Handel erfasst, was eine Menge von 117.710 t ergibt (ADEME 2014). Anteilig an der Sammelquote von 6,9 kg/Einwohner wurden demnach 1,8 kg/E*a bei Händlern gesammelt. 68 % der Mengen wurden über Wertstoffhöfe erfasst.

4.3.2.7 Irland

In Irland bestand auch vor der Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie für den Handel eine 1:1-Rücknahmeverpflichtung, wenn Verbraucher ein neues, gleichwertiges Gerät kaufen. Die Rücknahme von EAG wird durch die Hersteller finanziert, die die Rücknahme entweder selber organisieren oder einem Rücknahmesystem beitreten müssen. Von diesen gibt es derzeit zwei in Irland, WEEE Ireland und European Recycling Platform (ERP). Aber auch Händler werden in finanzielle Pflicht genommen und können diesen Rücknahmesystemen beitreten, die die gesammelten EAG abholen und zum Behandlungsbetrieb bringen. Seit der Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie im Jahr 2014 müssen Händler

mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte von ≥400 m² kleine EAG (äußere Maße ≤25 cm) auch auf einer 0:1-Basis zurücknehmen. Zusätzlich werden von den Kommunen Wertstoffhöfe unterhalten.

Im Jahr 2012 wurden in Irland insgesamt 40.818 t EAG gesammelt (Haushalts- und Nicht-Haushaltsgeräte zusammen) (EPA 2014). Auf WEEE Ireland gehen dabei 25.252 t zurück, von denen 11.682 t bei Händlern anfielen (46,3 %) (WEEE Ireland 2013). ERP registrierte 8.986 t, von denen 33 % respektive 2.965 t bei Händlern gesammelt wurden (ERP 2013). Damit macht der Handelsanteil beider Systeme zusammengenommen 14.647 t bzw. 35,9 % an der Gesamtsammelmenge aus. Anteilig an der Pro-Kopf-Menge von ca. 9,2 kg/E*a wurden demnach ca. 3,3 kg/E*a bei Händlern gesammelt.

4.3.2.8 Schweiz

In der Schweiz besteht bereits seit 2005 eine Rücknahmepflicht von EAG für Händler, die über die Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) (VREG 2005) geregelt wird.

So müssen Händler Geräte, die sie selber im Sortiment führen oder die sie selber hergestellt haben, von Endverbrauchern kostenlos und in allen Geschäften zurücknehmen (Art. 4), was einer 0:1-Rücknahme entspricht. Gleichzeitig sind aber auch die Verbraucher verpflichtet, ausgediente EAG an Hersteller, Händler, Importeure oder Sammelstellen zurückzugeben. Finanziert wird diese Rücknahme über eine von den Herstellern bei Verkauf der Geräte erhobene „vorgezogene Recyclinggebühr“ (vRG). Eine gemeinnützige Stiftung, die SENS, und ein Verbund von Schweizer Unternehmen, Swico, organisieren das gesamte Recyclingsystem. Die SENS – die im EU-Recht einer PRO entspräche - erhebt die jährlich neu festgelegte vRG und verwaltet die dabei anfallenden Mittel anteilig der Marktanteile der Hersteller. Zudem gibt es eine Stiftung der Leuchtmittelhersteller (SLRS), die gesammelte Leuchtmittel und Leuchten über das SENS-System recyceln.

Im Jahr 2013 hat SENS über sein Rücknahmesystem insgesamt 76.175 t EAG zurückgenommen und zur Verwertung weitergeleitet. Der Großteil von 82,8 % wurde über die insgesamt 479 Sammelstellen gesammelt, die vom Handel über das System gemeldeten Mengen betrugen 4.538 t respektive 6 %. Jedoch muss man anmerken, dass diese Zahlen die Mengen nicht beinhalten, die zwar vom Handel gesammelt wurden, deren Abwicklung aber über Abholaufträge von Dritten (zum Beispiel von Sammelstellen oder Transporteuren) ausgelöst wurden. Eine Umfrage unter Händlern zeigt, dass ca. 30 % der Befragten diese Optionen in der Vergangenheit bereits gewählt haben (SENS 2014). Die tatsächlich gesammelte Menge liegt daher vermutlich etwas höher (SENS 2013).

Swico hat im Jahr 2013 insgesamt 55.304 t EAG zur Verwertung weitergeleitet. Auch hier entfällt der Großteil von 65 % auf die 600 Sammelstellen. 8.849 t und damit 16 % der Mengen fielen beim Handel an (Swico 2013). Beide Systeme sammelten demnach im Jahr 2013 insgesamt 131.479 t EAG, was einer Quote von 16,21 kg/E*a entspricht. Mindestens 1,65 kg/E*a wurden demnach über den Handel gesammelt.

Unter den Sammelstellen der erwähnten Systeme befinden sich auch kommunal betriebene Recyclinghöfe (Ökihöfe), die mit Mitteln aus dem vRG-Fonds finanziert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, EAG mit einem Gewicht unter 30 kg bei Poststellen zurückzugeben, vorausgesetzt das Altgerät passt unter der Schalterscheibe hindurch. Weitere

Sammelsysteme werden regional angewandt kombiniert, wie beispielsweise Wertstoffmobil oder Depotcontainer in Bern. Straßensammlung ist hingegen eher unüblich (LANUV 2014).

In der oben erwähnten Umfrage im Jahr 2013 hat die SENS insgesamt 233 Händler zu den Erfahrungen mit der Rücknahmepflicht befragt. Während 85 % der Befragten angaben, dass der Transport der Geräte keine Probleme verursache, gaben etwas mehr als die Hälfte an, dass die Sammlung und Lagerung aufgrund von Platzmangel problematisch sei. Ein Viertel betonte zudem den Aspekt, dass Geräte von den Verbrauchern außerhalb der Öffnungszeiten abgestellt und dadurch zu einem erhöhten Arbeits- und Reinigungsaufwand führen würden (SENS 2014). Bei der Frage nach Verbesserungswünschen wurden die Optionen „Flexible Behältnisse“ und „Flexible Abholung (max. 48 Std.)“ am häufigsten priorisiert. Diese beiden Optionen könnten indirekt zur Behebung von Platzmangel beitragen.

4.3.2.9 Schweden

Schweden hat mit einer Sammelquote von 17,3 kg/E*a im Jahr 2013 mit Abstand eine der höchsten Sammelquoten für Elektroaltgeräte aus Haushalten in ganz Europa aufzuweisen (Naturvårdsverket 2014).

Die schwedische Sammelstruktur beruht auf einem sehr dichten Netz von etwa 630 Recyclinghöfen, an denen die größten Anteile der EAG gesammelt werden (Naturvårdsverket 2012). Diese haben oftmals auch sonntags geöffnet (LANUV 2014). Die Kommunen sind für die Sammlung der Altgeräte verantwortlich und finanzieren diese auch, wohingegen die Hersteller für den Transport, die Behandlung und das Recycling zuständig sind. Die Hersteller sind in zwei PRO´s organisiert, die die Behandlung der EAG übernehmen – El-Kretsen und Elektronikåtervinning (EÅF). El-Kretsen ist dabei für ca. 75 % der in Verkehr gebrachten Menge verantwortlich, EÅF für die restlichen 25 % (EAF 2014). Zusätzlich zu den Wertstoffhöfen bieten viele Kommunen eine Kombination aus weiteren Sammelsystemen, die zu den hohen Sammelquoten beitragen. So gibt es in 2/3 der Gemeinden jeweils drei bis vier weitere Sammelmaßnahmen parallel zu den Wertstoffhöfen, darunter Depotcontainersammlung, Wertstoffmobile, Sammlung in Betrieben und Abholung direkt bei den Haushalten (LANUV 2014).

In Schweden bestand vor der Umsetzung der WEEE-II-Richtlinie keine gesetzliche Verpflichtung für Händler zur Rücknahme von EAG. Dennoch konnten in ungefähr 200 Warenhäusern und Geschäften Elektroaltgeräte zurückgegeben werden, die von EÅF abgenommen werden (Naturvårdsverket 2012). Die dort gesammelten Mengen beliefen sich im Jahr 2013 auf ca. 3054 t (EÅF 2014a). Bei einer Gesamtsammelmenge von 166.209 t Elektroaltgeräten aus Haushalten im Jahr 2013 macht diese Menge 1,8 % der Gesamtmenge aus – oder 0,32 kg/E*a. Zu beachten ist, dass diese Zahl das Minimum darstellt. Da Händler, die nicht auch gleichzeitig Hersteller sind, keiner Verpflichtung unterliegen, gesammelte Mengen zu melden oder an eines der beiden Systeme zurückzugeben, ist es möglich, dass sie gesammelte Mengen ohne Dokumentation an Wertstoffhöfe übergeben. Auch führt El-Kretsen keine Zahlen darüber, welche Mengen sie vom Handel übernehmen. In den letzten Jahren hat die Bedeutung von Sammelstellen in Einkaufszentren zugenommen und sich auf 1.500 erhöht. Zahlen, welche Menge darüber gesammelt wird, liegen nicht vor (LANUV 2014). Die tatsächliche Menge der über den Handel gesammelten Alt-

geräte ist daher wahrscheinlich höher als die hier genannte, jedoch ist aufgrund des Aufbaus des schwedischen Sammelsystems zu vermuten, dass der Anteil der Händlersammlung bisher eher gering einzuschätzen ist, aber zunehmen wird.

Dies liegt auch an der Änderung der schwedischen Elektroaltgeräte-Verordnung vom 16. September 2014, mit der nun auch die Händlersammlung verpflichtend eingeführt wurde (SFS 2014). Dabei orientiert sich die Formulierung an den Vorgaben der WEEE II-Richtlinie und schreibt die Verpflichtung zur 1:1-Rücknahme und zur 0:1-Rücknahme für Geräte mit Abmessungen kleiner 25 cm in Geschäften mit einer Verkaufsfläche für Elektrogeräte von mindestens 400 m² vor (§ 57-58).

4.3.2.10 Großbritannien

Für Händler in Großbritannien gelten die Rücknahmeverpflichtungen, wie sie in der WEEE-II--Richtlinie formuliert wurden (BIS 2013, §§ 42-46), d. h. eine 1:1-Rücknahmeverpflichtung bei Kauf eines gleichwertigen Geräts und eine 0:1-Rücknahmeverpflichtung für Altgeräte mit Kantenlänge kleiner 25 cm in Geschäften mit einer Verkaufsfläche für Elektrogeräte von mindestens 400 m². Von dieser Sammelpflicht kann nur befreit werden, wer Mitglied in einem sogenannten Distributor Take Back Scheme (DTS) wird (§ 47) und entsprechend einen finanziellen Beitrag dazu leistet. Dieses System verteilt die finanziellen Mittel an bereits bestehende Wertstoffhöfe oder organisiert anderweitig die Einrichtung eines Netzwerks von Sammelstellen, die Sammlung und die Verwertung von EAG aus privaten Haushalten und wird von der Valpak Retail WEEE Services Ltd betrieben. Die Kosten dafür variieren je nachdem, wie viel Umsatz ein Händler mit Elektro- und Elektronikgeräten macht. Die Sammlung von EAG bei Händlern ist in Großbritannien gut dokumentiert. So wurden im Jahr 2013 ca. 55.560 t EAG in Geschäften gesammelt. Aus den Gesamtmengen von 472.879 t ergibt das einen Anteil von 11,75 % oder 0,87 kg/E*a von insgesamt 7,42 kg/E*a (Environment Agency 2014). Den Großteil davon machen Haushaltsgroßgeräte (26.607 t) und Kühlgeräte (20.691 t) aus.

4.3.3 Sammlung im Handel in EU-Ländern - Zusammenfassung

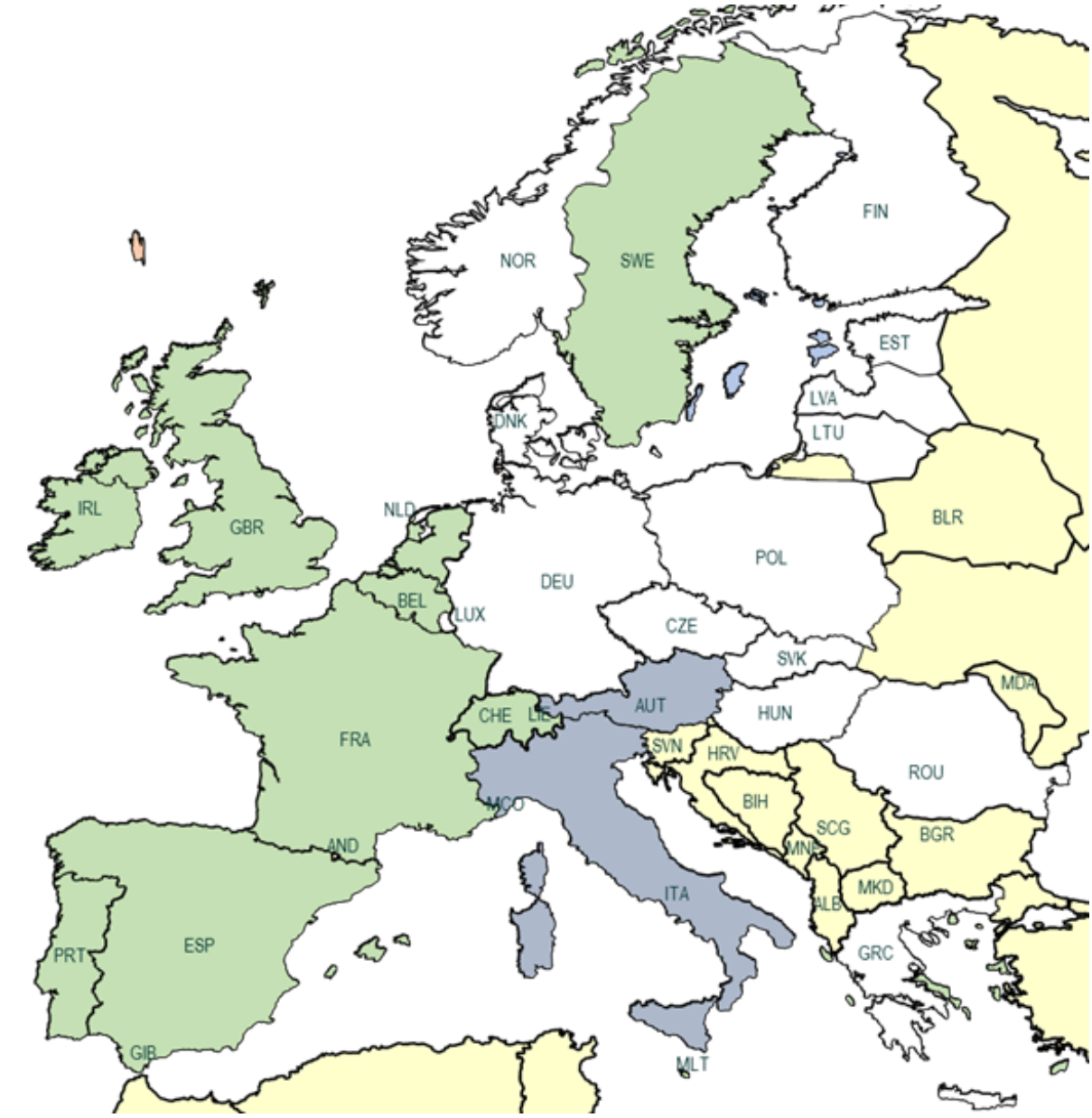
Tabelle 45 gibt einen Überblick über die Rolle des Handels in den ausgewählten europäischen Ländern und des ungefähren Anteils an den Sammelmengen.

Tabelle 45: Sammelverpflichtung und -quoten des Handels in andern europäischen Ländern

Land	1:1-Verpflichtung?	0:1-Verpflichtung für sehr kleine EAG?	Sammelquote pro Kopf gesamt	Anteil des Handels an Pro-Kopf-Quote	Anteil des Handels in %	Referenzjahr für Quoten
Belgien	Ja	Bedingt	10,41 kg	2,2 kg	21 %	2013
Dänemark	Nein	Nein	12,7 kg	k. A.	k. A.	2013
Frankreich	Ja	Ja, seit 2014 (≥ 400 m²)	6,9 kg	1,8 kg	26 %	2012

Land	1:1-Verpflichtung?	0:1-Verpflichtung für sehr kleine EAG?	Sammelquote pro Kopf gesamt	Anteil des Handels an Pro-Kopf-Quote	Anteil des Handels in %	Referenzjahr für Quoten
Großbritannien	Ja	Ja (≥ 400 m^2)	7,42 kg	0,87 kg	11,75 %	2013
Italien	Ja	Nein	Offiziell: 4,3 kg	Offiziell: mind. 0,2 kg Geschätzt: 4 kg	Offiziell: 5 % Geschätzt: 35,7 %	2011
Irland	Ja	Ja, seit 2014 (≥ 400 m^2)	9,2 kg	3,3 kg	35,9 %	2012
Niederlande	Ja	Ja (≥ 400 m^2; Prüfung möglich)	6,8 kg	2,3 kg	34 %	2013
Österreich	Ja, seit 2014 (Ausnahmen bei Geschäften ≤ 150 m^2)	Nein	9 kg	k. A.	k. A.	2013
Schweden	Seit 2014	Seit 2014 (≥ 400 m^2)	17,3 kg	mind. 0,32 kg	mind. 1,8 %	2013
Schweiz	Ja	Ja	16,21 kg	mind. 1,65 kg	mind. 10,2 %	2013

Abbildung 27: Sammlung von EAG durch Vertreiber in der EU (Stand: 2014); Grün: 1:1-Sammlung + 0:1-Sammlung, Blau: 1:1-Sammlung



Quelle: eigene Darstellung

4.4 Ergänzende Sammelsysteme in EU-Staaten

In diesem Abschnitt werden Systeme zur Sammlung von kleinen EAG vorgestellt, die in anderen Mitgliedstaaten der EU umgesetzt sind. Es wurden Länder mit besonders hohen Sammelquoten identifiziert und deren Sammelsysteme in die Analyse einbezogen[38]. Die

[38] Die Datengrundlage für die Berechnung der Sammelquoten in den einzelnen EU-Mitgliedsstaaten ist teilweise in ihren Höhen und Schwankungen nicht plausibel. Der Vergleich der Sammelquoten kann als Betrachtung von Größenordnungen gesehen werden.

anderen Mitgliedstaaten haben teilweise bereits mehrjährige Erfahrungen mit ergänzenden Sammelsystemen.

Schweden weist eine der höchsten Gesamtsammelquoten in Europa auf. Eine spezifische Datengrundlage zu den erfassten Anteilen an RePro-Geräten ist allerdings nicht verfügbar. Auffällig ist, dass die Mehrzahl der schwedischen Kommunen über mehr als ein Sammelsystem für kleine Elektroaltgeräte verfügt. Neben dem klassischen Wertstoffhof, der in fast allen Kommunen verfügbar ist, weisen 85 % der Kommunen mindestens zwei weitere Sammlungen auf, einige sogar bis zu fünf weitere. Am stärksten verbreitet sind dabei Abholsysteme von den Privathaushalten (etwa 27 %), ein sogenanntes Grünes Auto mit festem Standpunkt (25 %) und Annahmestellen im Einzelhandel (20 %) (Miljö & Avfalls Byrån 2012).

Einige dieser Systeme werden im Folgenden genauer beschrieben. Bei einigen Sammelsystemen handelt es sich um Versuche, weshalb Kriterien wie Anzahl der Sammelstellen oder Dauerhaftigkeit keine Bedeutung erhalten. Des Weiteren ist zu beachten, dass durch die begrenzten Versuchszeiträume die Aussagen nur begrenzt allgemeingültig sind.

4.4.1 Samlaren in Schweden

Das Sammelsystem Samlaren (siehe Abbildung 28) wurde in einem zwölfmonatigen Sammelversuch (2009-2010) in den Eingangsbereichen von vier Supermärkten und zwei Elektrofachgeschäften getestet. Neben kleinen Elektroaltgeräten werden in diesem Behälter Kompaktleuchtstofflampen und Batterien gesammelt.

Abbildung 28: Sammelbox des Sammelsystems Samlaren für kleine Elektroaltgeräte und Batterien



Quelle: Avfall Sverige (2010)

Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 812 kg kleine EAG gesammelt, was einem Mittelwert von etwa 135 kg pro Station und Jahr entspricht. Auffällig ist, dass an den Standorten in Supermärkten im Durchschnitt 42 % höhere Sammelmengen pro zahlender Kundin und zahlendem Kunden erzielt wurden als in den Elektrofachgeschäften (Avfall Sverige 2010).

4.4.1.1 Verbraucherfreundlichkeit

Der Behälter ist zu den Ladenöffnungszeiten zugänglich.

Die Zugangszeiten überschneiden sich teils mit den üblichen Arbeitszeiten; es bleiben eine bis drei Stunden pro Tag außerhalb der Arbeitszeiten und hohe Zugänglichkeit auch samstags.

Es fallen keine Extrawege an, da die zu entsorgenden Altgeräte zum Einkauf mitgenommen werden können.

4.4.1.2 Zweckmäßigkeit des Behälters

Der Behälter schützt die Altgeräte vor Diebstahl und Sabotage.

Im Sammelversuch wurden keine Schäden durch die Sammlung an den Altgeräten festgestellt.

4.4.1.3 Kosteneffizienz

- Anschaffung des Behälters: 475 €/a[39]
- Abholung der Altgeräte: 710 €/a
- Gesamt: 9 €/kg

4.4.2 Örebrö-modellen in Schweden

Das Örebrö-modell (siehe Abbildung 29) ist ein seit 2001 etabliertes System, bei dem Elektroaltgeräte, Kompaktleuchtstofflampen, Leuchtstoffröhren und Batterien in den Eingangsbereichen von Supermärkten, Einkaufszentren oder Elektrofachgeschäften gesammelt werden. Die kleinen Wagen sind gut transportabel und eine Entleerung durch die herausnehmbaren Boxen problemlos möglich.

Im Januar 2010 wurde eine Sammelanalyse an 13 Standorten durchgeführt. Dabei wurde eine Sammelmenge von insgesamt 348 kg kleiner Elektroaltgeräte erzielt, was 321 kg pro Box und Jahr entspricht.

[39] Für alle vorgestellten Systeme wird eine Lebensdauer von 10 Jahren angenommen.

Abbildung 29: Sammelboxen des Örebrö-modellen



Quelle: El-Kretsen (2011)

In einer Restabfallanalyse in Örebrö nach Einführung des Sammelbehälters wurde ein Wert von 0,2 Gewichtsprozenten Elektroaltgeräte im Restabfall erzielt. Eine Analyse vor der Einführung wurde nicht durchgeführt (El-Kretsen 2011), sodass nicht sicher gesagt werden kann, ob bereits vorher ein solch geringer Anteil von EAG in den Restabfall gelangte.

4.4.2.1 Verbraucherfreundlichkeit

Der Behälter ist zu den Ladenöffnungszeiten zugänglich, bei Supermärkten und Einkaufszentren 12 h/d, beim Elektrofachhandel 9 h/d.

Die Zugangszeiten überschneiden sich teils mit den üblichen Arbeitszeiten; es bleiben eine bis drei Stunden pro Tag außerhalb der Arbeitszeiten und hohe Zugänglichkeit auch samstags.

Es fallen keine Extrawege an, da die zu entsorgenden Altgeräte zum Einkauf mitgenommen werden können.

4.4.2.2 Zweckmäßigkeit des Behälters

Der Behälter schützt die Geräte nicht vor Diebstahl.

Es wurden negative Erfahrungen mit Sabotage und Diebstahl der Wagen gemacht.

Es empfiehlt sich ein Standort unter Aufsicht von Personal.

4.4.2.3 Kosteneffizienz

- Anschaffung des Behälters: 35 €/a
- Abholung der Geräte: 1.100 €/a
- Gesamt: 4 €/kg

4.4.3 Umeva-modellen in Schweden

Das Umeva-modellen ist ein 3,5 x 1,5 m großer Depotcontainer, der im Freien, zum Beispiel auf Parkplätzen von Supermärkten oder Geschäften, aufgestellt wird (siehe Abbildung 30). Neben kleinen Elektroaltgeräten werden Glühlampen, Kompaktleuchtstofflampen und Batterien in passenden Boxen des Entsorgers gesammelt. Die Leerung erfolgt über Leicht-LKW mit Ladebordwand (light truck equipped with tail lift.).

Von 2009 bis 2012 wurde ein Sammelversuch mit drei Containern durchgeführt und so eine Sammelmenge von insgesamt 3.098 kg kleiner Elektroaltgeräte erzielt. Das entspricht 1.033 kg pro Box und Jahr.

Abbildung 30: Sammelcontainer des Umeva-modellen



Quelle:miljodirektoratet (2015)

4.4.3.1 Verbraucherfreundlichkeit

Der Container ist rund um die Uhr an sieben Tagen in der Woche zugänglich.

Wenn der Container (wie angedacht) auf Parkplätzen von Supermärkten aufgestellt wird, fallen keine Extrawege für die Verbraucher an, da die zu entsorgenden Altgeräte zum Einkauf mitgenommen werden können.

4.4.3.2 Zweckmäßigkeit des Behälters

Der Behälter schützt die Altgeräte sehr gut vor Diebstahl und Sabotage.

Die Einwurföffnung ist mit 1,5 m über dem Boden recht hoch und mit 20 x 30 cm relativ klein, sodass größere Geräte der Sammelgruppen 3 und 5 nicht hinein passen.

Durch den hohen Einwurf drohen intakte Altgeräte funktionsunfähig zu werden (variable Böden werden nicht genutzt).

4.4.3.3 Kosteneffizienz

- Anschaffung des Behälters: 620 €/a
- Abholung der Geräte und Wartung des Containers: 1600 €/a
- Gesamt: 2 €/kg

4.4.4 Skellefteå-Anhänger in Schweden

Dieser Anhänger (siehe Abbildung 31), getestet in der Gemeinde Skellefteå, dient zur mobilen Sammlung in ländlichen Regionen, in denen Nutzer einen weiten Weg zum nächstgelegenen Wertstoffhof zurücklegen müssen. Für den Sammelversuch wurden sechs Kommunen mit 100 bis 300 Einwohnern, die eine Mindestentfernung von 20 km zum nächsten Wertstoff haben, ausgewählt. Der Anhänger wurde alle 10 Wochen für 14 Tage an einem zentralen Platz der Kommune aufgestellt, danach entleert und in den nächsten Ort gefahren.

Neben kleinen Elektroaltgeräten werden auch Kompaktleuchtstofflampen und Batterien gesammelt.

Abbildung 31: Skellefteå-Anhänger



Quelle:miljodirektoratet (2015)

4.4.4.1 Verbraucherfreundlichkeit

Der Anhänger ist nur für einen begrenzten Zeitraum (im Sammelversuch 14 Tage alle 10 Wochen) in der jeweiligen Kommune verfügbar

Mögliche Extrawege werden durch zentrale Stellplätze minimiert

4.4.4.2 Zweckmäßigkeit des Behälters

Der Behälter schützt die Geräte vor Diebstahl und Sabotage.

4.4.4.3 Kosteneffizienz

- Anschaffung des Behälters: 900 €/a
- Abholung des Anhänger und laufende Kosten (Versicherung,…): 6.000 €/a
- Gesamt: 6 €/kg

4.4.5 Zwischenfazit zu ergänzenden Sammelsystemen in Schweden

Bei den bisher vorgestellten Systemen erreicht der Depotcontainer (Umeva-modellen) die beste Kosteneffizienz, vor der Sammlung mit einfachen Behältnissen im Einzelhandel

(Örebrö-modellen) und auch vor der Sammlung mit einem mobilen Anhänger in ländlichen Regionen (Skellefteå-Anhänger). Als am kostenineffizientesten erweist sich das System mit aufwendigen Behältnissen im Einzelhandel (Samlaren). Dabei ist anzumerken, dass die Kosten jeweils stark von der Art der Behälter geprägt sind. Die Kosten für die Abholung lägen, bei einem dichteren Netz an Sammelstellen als es in den Sammelversuchen der Fall war, deutlich niedriger, was die Kosteneffizienz in Kombination mit einer gesteigerten Sammelmenge deutlich erhöhen würde. Die höchste Sammelmenge entfällt auf die mobile Sammlung in ländlichen Regionen (Skellefteå-Anhänger) mit einer Bevölkerung von lediglich 600 bis 1.800 Menschen, die Zugang zu diesem System hatten. Daraus kann geschlossen werden, dass in ländlichen Regionen ein besonders hohes Potenzial zur Steigerung der Sammelmengen liegt. Vermutlich ist dies auf die weite Entfernung zum Wertstoffhof und den damit verbundenen hohen Aufwand im Vergleich zu Stadtbewohnern zurückzuführen.

Auffällig ist außerdem, dass alle städtischen Sammlungen in der unmittelbaren Nähe von Einkaufsmöglichkeiten und Supermärkten durchgeführt wurden. Bei der Durchführung der Sammelversuche wurde daher wohl besonderer Wert darauf gelegt, dass den Verbrauchern keine Extrawege entstehen, indem sie die Abgabe ihrer Elektroaltgeräte mit alltäglichen Handlungen wie Einkaufen verbinden können.

Allgemein ist zu beachten, dass alle ermittelten Werte, wie Sammelmenge oder Kosteneffizienz, mit einmaligen Sammelversuchen erhoben wurden und dementsprechend mit Unsicherheiten bzgl. der Kontinuität beim Fortführen der Sammelsysteme verbunden sind. Aufgrund der relativ langen Versuchsdauer der Systeme kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die erzielten Sammelmengen nicht auf Entrümpelungseffekten basieren.

Anmerkung: Eine Beurteilung der Sammelsysteme nach ADR-Konformität erfolgte nicht, da zum Untersuchungszeitpunkt entsprechende Bewertungskriterien noch nicht vorlagen.

4.4.6 Kerbside system in Großbritannien

In einer britischen Kleinstadt (44.000 Einwohner) wurde ein Abholsystem für kleine Elektroaltgeräte von den Haushalten über drei Monate im Jahr 2008 getestet. Dabei wurden die Altgeräte bei der Abfallsammlung „nebenbei“ in separaten Abfallsäcken mit erfasst (siehe Abbildung 32). In diesem Zeitraum wurden so insgesamt knapp 3.000 kg kleine EAG gesammelt.

Abbildung 32: Kerbside system zur Sammlung von kleinen EAG bei der Sperrmüllentsorgung



Quelle: WRAP (2009)

In der Evaluierung der Studie wird angemerkt, dass eine Abholung alle drei bis sechs Monate genügen würde, da eine höhere Frequenz die Sammelmenge kaum steigert, aber erheblich höhere Kosten verursacht (WRAP 2009).

Auffällig war, dass durch die Sammlung viele vorher funktionierende Geräte beschädigt wurden und für die Wiederverwendung nicht mehr geeignet waren. Daraus entstand die Idee, die Altgeräte nicht wie bisher in Plastikbeuteln zu sammeln, sondern kleine Boxen an Haushalte zu vergeben. Die Boxen könnten dann auch als ein Element zum Sperrmüll gestellt werden. Dadurch ließen sich die entstehenden Abholkosten minimieren.

Allerdings würde dies ein erhöhtes Risiko für Diebstähle nach sich ziehen. Bereits jetzt werden in Deutschland Sperrmüllsammlungen nach Elektroaltgeräten durchsucht. Wenn diese in einer frei zugänglichen Box gesammelt auf der Straße stehen, würde die Zahl der Diebstähle in diesem Bereich vermutlich stark ansteigen.

4.4.7 Boxensammlung – Beispiel Red Box in Schweden

Eine ähnliche Box wie in Großbritannien wurde in Schweden bereits getestet, allerdings nicht in Kombination mit der Abholung beim Sperrmüll.

Abbildung 33: Red Box zur Sammlung von kleinen EAG direkt im Haushalt in Schweden



Quelle: El-Kretsen (2011)

In Järfälla wurde 2009 an jeden Haushalt der Stadt eine 20 l Box verteilt, in der kleine Elektroaltgeräte gesammelt werden sollten. Zur Einsammlung wurde ein Abholsystem eingerichtet, bei dem die Bürger Bescheid geben konnten, sobald die Box voll war. Diese wurde dann kostenlos abgeholt.

Das System wurde nicht in dem Maße wie erwartet angenommen. So nutzten nur etwa 5 % der Haushalte die Möglichkeit zur kostenlosen Abholung. Allerdings geht die Kommune davon aus, dass die Red Box zur Sammlung in den Haushalten genutzt wurde, diese dann aber von den Bürgern selbst gemeinsam mit anderen Abfällen zum Wertstoffhof gebracht wurde.

Eine Sortieranalyse des Restabfalls nach Einführung dieses Systems zeigte einen verringerten Anteil an Elektroaltgeräten im Vergleich zur Analyse von 2006. Eine Quantifizierung ist nicht verfügbar (El-Kretsen 2011).

4.4.8 Boxensammlung – Beispiel Jekko in den Niederlanden

Ebenfalls eine haushaltsbasierte Sammlung wird in den Niederlanden mit dem Jekko durchgeführt Diese einfache Pappbox enthält drei herausnehmbare Fächer für kleine EAG, Batterien und Kompaktleuchtstofflampen. Die Sammelbox wird vom niederländischen Betreiber Wecycle kostenlos zur Verfügung gestellt und in Werbekampagnen stark beworben. Teil dieser Kampagnen sind unter anderem Sammelevents, bei denen vornehmlich Schüler kleine Elektroaltgeräte von den Privathaushalten zu zentralen Sammelpunkten bringen (Wecycle 2012).

Abbildung 34: Sammelbox Jekko



Quelle: Wecycle (2012)

4.4.9 Sammlung von Elektrokleingeräten mit Depotcontainern in Deutschland

Um die kommunalen Angebote verbrauchernah auszubauen und die Sammelmengen zu steigern, wird seit einigen Jahren in mehreren Städten und Landkreisen Deutschlands als ergänzendes Angebot zu den Wertstoffhöfen die Sammlung von Elektrokleingeräten auch der Sammelgruppen 3 & 5 mit Depotcontainern erprobt, teils in Pilotversuchen, teils aber auch schon flächendeckend. Depotcontainer haben im Vergleich zu kommunalen Sammelhöfen den Vorteil, rund um die Uhr erreichbar zu sein. Gleichzeitig können sie verbrauchernäher und in größerer Dichte aufgestellt werden. In der Diskussion ist die Frage der ADR-Konformität, siehe Kapitel 0.

4.4.9.1 Sammelmengen

Im Zeitraum von März bis April 2015 wurden zehn Entsorgungsträger zu ihren bisher mit der Depotcontainersammlung gemachten Erfahrungen befragt.[40] Die Anzahl der aufgestellten Depotcontainer variiert dabei zwischen sechs im Landkreis Schaumburg und 110 in Leverkusen. Die Sammelergebnisse lagen zwischen 0,3 kg Elektroaltgeräte/E*a und 1,5 kg Elektroaltgeräte/E*a. Die Entsorgungsträger stufen diese Mengen überwiegend als Zusatzmengen zur Sammlung auf den Wertstoffhören ein. In über der Hälfte der Fälle konnte dies über ein Monitoring der Mengenentwicklung über die Jahre und bei den Sammelstellen belegt werden. In einem Fall konnte eine Mengensteigerung nicht

[40] RSAG Siegburg; EGST Steinfurt; AVE Paderborn; GEG Gütersloh; AWS Schaumburg; TBR Remscheid; Kreis Höxter; GEB Göttingen; AVEA Leverkusen; Bergischer Abfallwirtschaftsverband.

festgestellt werden, da bisher zu wenige Depotcontainer aufgestellt waren um signifikante Mengeneffekte feststellen zu können. Die Ergebnisse der Befragungen sind in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46: Überblicksdarstellung zur Sammlung von EAG über Depotcontainer (DC); Stand 03.2015 soweit nicht anders angegeben

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
RSAG Siegburg	Ca. 584.000	Okt 14	25	2015 bisher (ca. 10 Wochen): 218 Leerungsvorgänge, Gesamtmenge ca. 46 t = 0,221 t/Leerung; hochgerechnet auf ein Jahr: 239 t (= 0,41 kg/E*a) Mengen allerdings rückläufig (0,15 t/Leerung; = 170 t/a = 0,29 kg/E*a)	k. A.	Schadstoffmobil, Gitterboxen in Großwohnanlagen, 240 l MGB-Tonne in Schulen, zwei Umschlagsstationen	eindeutig Zusatzmengen	Schüttung	

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
EGST Steinfurt	Ca. 340.000	Pilotversuch seit 2012, flächendeckend seit 2013	83	2014: 0,7 kg/E*a; Leerungsintervall zw. 3-5 Wochen	„Nullgeschäft“	11 Übergabestellen, plus Holsysteme in einigen Gemeinden	zusätzliche Mengen	Schüttung	Anmerkung: Kreis Tecklenburg (ca. 100.000 EW) übergibt gesammelte EAG an EGST, dort ebenfalls 0,7 kg/E*a
AVE Paderborn	Ca. 298.000	im Laufe 2014	75 (Stand Ende 2014)	2014: ca. 200 t (= 0,67 kg/E*a)	k. A.	Wertstoffhöfe	keine belastbaren Zahlen; gesammelte EAG SG 3 & 5 insgesamt: ca. 1.200 t	Schüttung	wegen ADR-Diskussion alle DC bis auf einen seit Ende 2014 wieder abgezogen

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
GEG Gütersloh	Kreis Warendorf: ca. 300.000	2013	50	ca. 337 t (= 1,1 kg/E*a); (hier jedoch auch Mengen der Straßensammlung aus der Stadt Ennigerloh enthalten)	ca. 60 € netto	13 Wertstoffhöfe	ca. 20-30 % Zunahme	händische Leerung & Sortierung (umgebaute Altkleidercontainer)	
	Kreis Gütersloh: ca. 300.000		63	ca. 156 t (= 0,52 kg/E*a) ; nicht alle Container über das gesamte Jahr aktiv		11 Wertstoffhöfe		Schüttung	sollte zum 01. Juli 2015 eingestellt werden, wenn keine Lösung für ADR-Problem gefunden wird

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
AWS Schaumburg	Ca. 20.000	2013	6	ca. 1,5 kg/E*a (= 30 t/a)	k. A.	Recyclinghöfe mit 2 Öffnungstagen im Monat; Sperrmüllabfuhr	Zusatzmengen	Schüttung	Tendenz ging wegen ADR-Thematik Richtung Einstellung des Sammelsystems, auch aufgrund der Konkurrenz durch die verpflichtende Händlersammlung
TBR Remscheid	Ca. 110.000	Anfang 2013	9	ca. 33 t (= 0,3 kg/E*a); Leerung ca. alle drei Wochen	k. A.	Wertstoffhof; Sperrmüllabfuhr	keine Mengensteigerung festgestellt (Grund: geringe Anzahl DC);	Schüttung	

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
							2013 insgesamt 475 t SG 3 & 5 gesammelt		
Kreis Höxter	Ca. 143.000	2013	21	2013: 55 t (= 0,38 kg/E*a) ; 2014: 80 t (= 0,56 kg/E*a)	k. A.	Wertstoffmobil; Wertstoffhof (zwei Tage/Woche); Schadstoffsammlung; angemeldete Abholung	Zusatzmengen; 2012 (vor Einführung der DC) insgesamt 502 t SG 3 & 5 gesammelt; 2013: 524 t (+4 % ggü. 2012); 2014: 558 t (+11 % ggü. 2012)	Schüttung	Angedacht, neue Container mit 1.100 l MGB-Behältern auszustatten, die bei Leerung ausgetauscht werden.

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
GEB Göttingen	Ca. 130.000	Jul 14	17	in 8 Monaten: 31 t; hochgerechnet 46 t/a (= 0,35 kg/E*a)	Containermiete = 7000 €/a; Systemkosten = 5000 €/a; umgerechnet auf eine Tonne: 261 €/t	Recyclinghöfe; Sperrmüllabfuhr	keine konkreten Zahlen, Vermutung dass Zusatzmengen; 2014 insgesamt 516 t SG 3 & 5 gesammelt	anfangs Schüttung, dann Austausch der ganzen Container	Nullgeschäft, da Kosten für Sortierung der Geräte im Restmüll nun geringer sind

Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
Bergischer Abfallwirtschaftsverband	550.000	2013	67 (seit Ende 2014)	erstes Quartal 2015: 54 t; hochgerechnet 216 t/a (= 0,39 kg/E*a)	Behälter & Transport 150 €; entsprechende Erlöse aus Vermarktung	Schadstoffmobil; Recyclinghöfe	Zusatzmengen (ca. 20 % mehr)	Schüttung	bisher keine Probleme mit Lithiumbatterien; an Containern ist Hinweis zur Entnahme von Batterien angebracht; zukünftig evtl. direkter Transport von Containern zu Verwertungsanlage ohne Zwischenlagerung bei Wertstoffhof, dadurch aber teurer

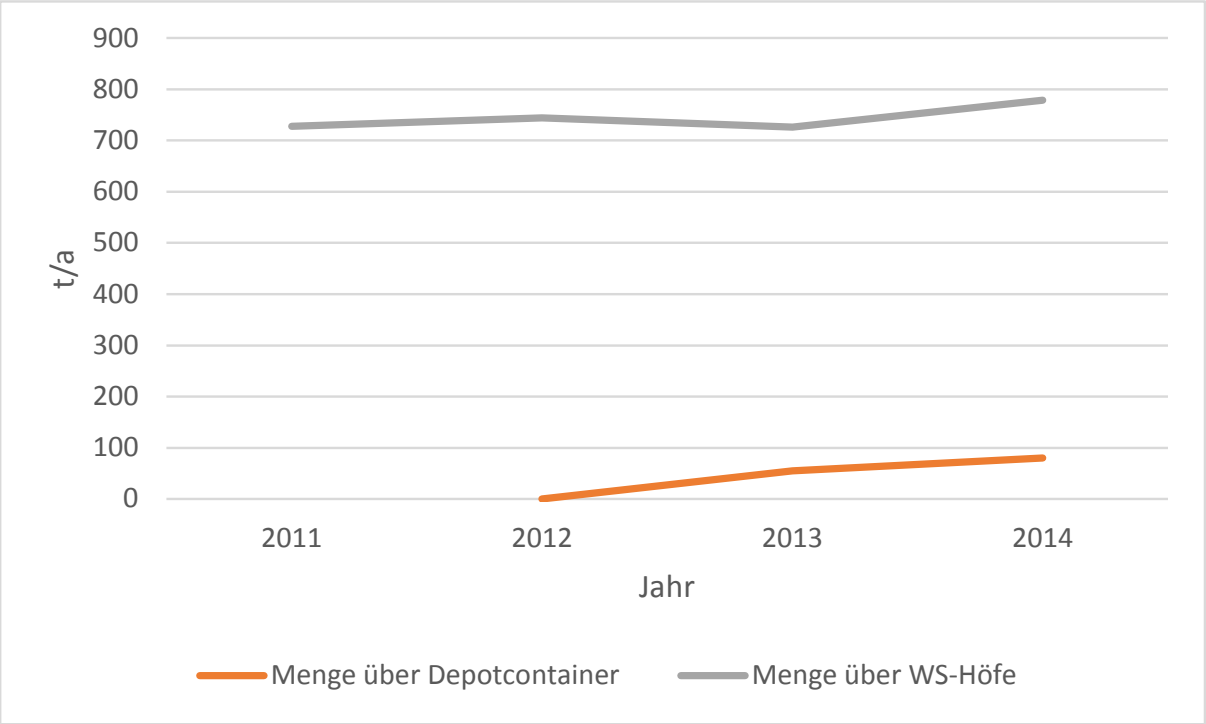
Entsorgungsträger	Einwohner im Entsorgungsgebiet	Sammlung mit DC seit	Anzahl DC	Sammelmenge SG 3 & 5 über DC	Kosten pro Tonne	Welche Sammelsysteme vor zusätzlicher Einführung der DC	Mengenentwicklung vorher/ nachher	Wie findet Leerung statt	Anmerkungen
AVEA Leverkusen	720.000	Anfang 2015	110	in zwei Monaten: 55 t; hochgerechnet auf ein Jahr: 330 t (= 0,46 t/E*a); Leerungsrhythmus 2-4 Wochen	schwarze Null, wenn weite Transportwege nicht wären	Wertstoffhöfe; Wertstoffmobil; Sperrmüllsammlung	vermutlich Zusatzmengen	Schüttung	wenn ADR-Thematik gelöst wird, Ausweitung des Systems
AWG Wuppertal[41]	Ca. 348.000	Jan 2012	442 (Stand 2012)	2011 (vor Einführung der DC): 746 t (= 2,14 kg/E*a) 2012: 1215 t (= 3,49 kg/E*a)	k. A.	Wertstoffhöfe, Abgabestellen im Einzelhandel	Zusatzmengen	Schüttung	

Quelle: eigene Erhebung

[41] Die AWG Wuppertal wurde bereits im Jahr 2012 zu ihren Erfahrungen befragt.

Abbildung 35stellt den Mengenverlauf im Kreis Höxter in den Jahren 2011 bis 2014 dar, wo nach einem geringen Einbruch der Sammelmengen der Wertstoffhöfe bei der Einführung der Depotcontainer im Jahr 2012 ein Mengenanstieg sowohl bei den Wertstoffhöfen als auch bei den Depotcontainern festgestellt wurde.

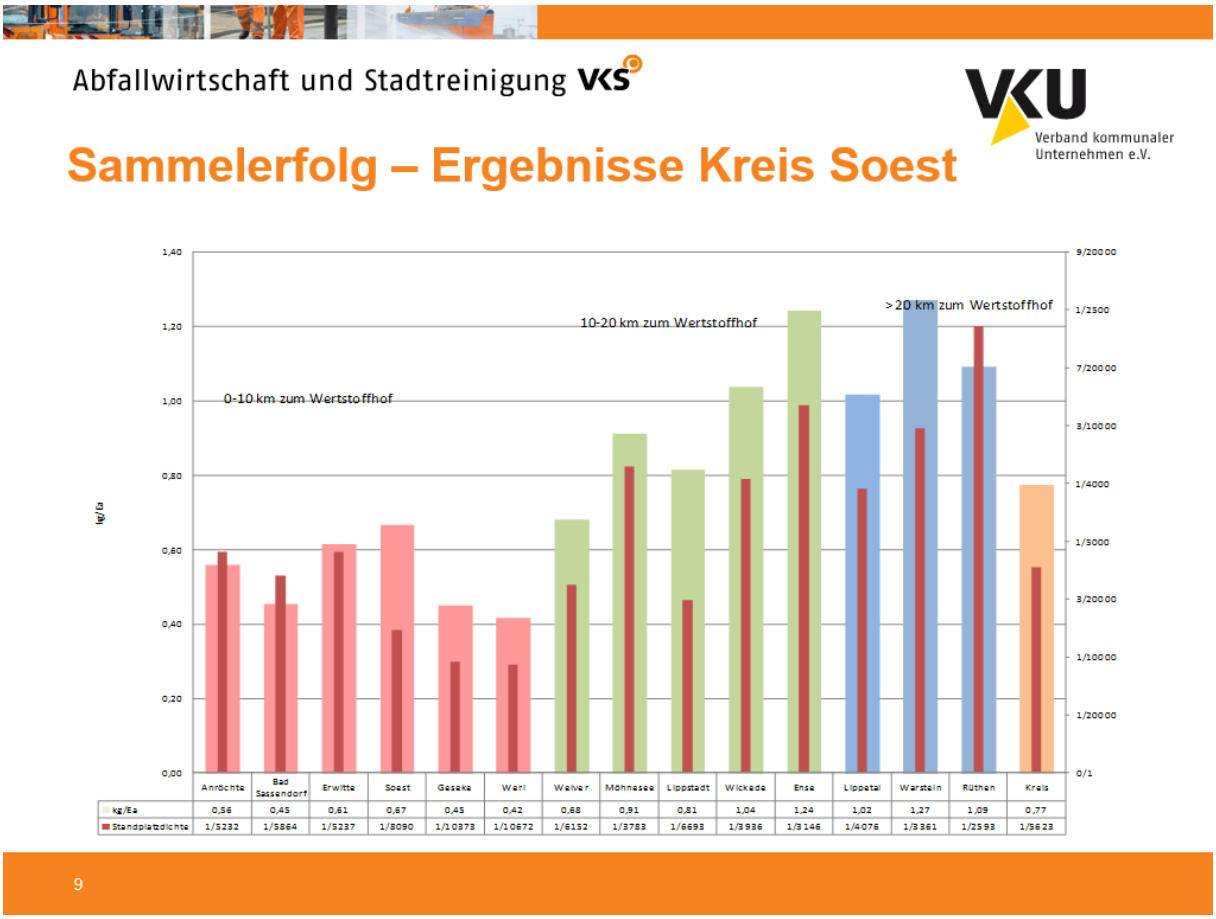
Abbildung 35: Sammelmengen SG 3 und 5 im Kreis Höxter



Quelle: Kreis Höxter pers.com. Herr Abraham am 9.2.2015

Abbildung 36 stellt die gesammelten Mengen über Depotcontainer im Vergleich zur Entfernung zu den Wertstoffhöfen und der Stellplatzdichte dar. Dabei wird deutlich, dass die Sammelmenge mit zunehmender Entfernung zum Wertstoffhof steigt.

Abbildung 36: Sammelmengen über Depotcontainer im Vergleich zur Entfernung zum Wertstoffhof und der Stellplatzdichte



Quelle: Neubauer 2014

Exkurs: Depotcontainer und ADR-Konformität

Ein zentrales aktuelles Thema ist für die Entsorgungsträger die ADR-Konformität der Depotcontainersammlung aufgrund möglicher enthaltener Lithium-Ionen-Batterien in den eingeworfenen Elektroaltgeräten und der damit verbundenen Brandgefahr. Der Großteil der 10 befragten Entsorgungsträger (siehe Tabelle 46) leerte zum Zeitpunkt der Befragung Anfang 2015 die aufgestellten Container per Schüttung in einen LKW. Mehrere Entsorgungsträger gaben an, ihre Systeme in naher Zukunft einstellen zu müssen, wenn keine Lösungen für dieses Problem gefunden werden, die auch für die Unternehmen wirtschaftlich vertretbar sind. Die Sammlung im Landkreis Paderborn wurde aus diesem Grund zu Ende 2014 bereits eingestellt, obwohl die insgesamt 75 Container dort erst im Laufe des Jahres 2014 aufgestellt worden waren und die Sammelergebnisse zufriedenstellend waren. Einige der Entsorgungsträger dachten bereits über Möglichkeiten nach, ihre Systeme ADR-konform zu verändern. So wurde z. B. getestet, ob neue Container mit 1.100 l-Müllgroßbehältern (MGB) ausgestattet werden können, die bei Leerung der Depotcontainer ausgetauscht werden. Auch die Variante mit herausnehmbaren

Gitterboxen war im Gespräch. Ein Entsorgungsträger verwendete von Anfang an umgebaute Altkleidercontainer, die von Mitarbeitern händisch geleert und Altgeräte mit Lithium-Ionen-Batterien vor Ort heraussortiert werden.

4.4.9.2 Kosten der Sammlung über Depotcontainer

Aus den vorliegenden Informationen zu den Versuchen zur Sammlung über Depotcontainer kann bisher keine allgemeine Bewertung der Sammlungskosten abgeleitet werden. Nach Einschätzung des VKU wird davon ausgegangen, dass sich die Sammlung nicht rechnet, wenn die Systemgrenzen der Betrachtung beim kommunalen Sammelsystem sind. Eine tendenziell bessere ökonomische Situation ergebe sich jedoch, wenn mögliche alternative Sammelsysteme durch andere (private) Sammler einbezogen würden. Die spezifischen Kosten der durch die örE bei Wertstoffhöfen gesammelten EAG würden dann steigen, da die Fixkosten bei den Wertstoffhöfen bei sinkenden Mengen gleichblieben (Hr. Neubauer VKU VKS RePro Workshop November 2014).

Tabelle 47: Beispielrechnung zu Kosten der Sammlung über Depotcontainer (DC), Szenario: Depotcontainer werden in einen Sammel-LKW entleert

Nr.	Kostenelement	Wert	Quelle
1	Kosten der Sammlung über LKW	65 €/h	pers. Kom. örE
2	Containerinhalt bei Leerung	0,15 – 0,3 t	eigene Erhebung
3	Erlös für die gesammelten EAG bei Abnahme durch den Erstbehandler	90 €/t	EUWID Recycling Stand 1.2015; Mittelwert
4	EAG-Wert pro Leerung	13,5 – 27 €	Zeilen 2*3
5	EAG Wert > Kosten Sammlung	5 DC/h bis 3 DC/h	Zeilen 1/4
6	Zeit je DC-Leerung	12 Min.– 20 Min.	60 Minuten/h/Zeile 5

Bei dieser überschlägigen Beispielrechnung wird deutlich, dass die Rentabilität der Sammlung über Depotcontainer auch wesentlich von der Optimierung des Leerungszeitpunktes abhängig ist und von der Zeit, die für die Strecke zwischen den Containern benötigt wird. Zu berücksichtigen ist dabei auch die maximale Zuladung der Sammel-LKW (z. B. 3 t) bis eine Leerung an einem zentralen Lager oder einem Erstbehandler bzw. Wertstoffhof notwendig ist. Die individuelle abfallwirtschaftliche Infrastruktur des Sammelgebietes (Erstbehandler, Zwischenläger, etc.) hat somit wesentliche Auswirkungen auf die Sammelkosten.

4.4.9.3 Zwischenfazit

Insgesamt betonten die befragten Entsorgungsträger die positiven Erfahrungen mit dem Sammelsystem Depotcontainer und gaben an, die Sammlung fortzuführen, wenn sie sich ADR-konform und wirtschaftlich gestalten lässt. Gerade für die Sammlung in ländlicheren Gebieten sei dieses Sammelsystem jedoch besonders interessant, zum Einen, weil die Entfernungen zu den kommunalen Wertstoffhöfen oftmals recht weit sind und zum Anderen, da es weniger Geschäfte gibt, die das nach dem neuen ElektroG erforderliche Kriterium für eine verpflichtende Händlersammlung von mindestens 400 m² Verkaufsfläche erfüllen (vgl. Kapitel 4.3).

Allgemein ist anzumerken, dass sich die ergänzenden Sammel-systeme in Versuchsphasen bzw. im Aufbau deutlich verändern. Die Gestaltung der Einwurföffnungen bei den Depotcontainern sowie die Gestaltung von Sammelboxen werden entsprechend den Erfahrungen in der Praxis immer wieder optimiert.

In Herford wird ein weiterer Erfassungsweg der Elektrokleingeräte im Rahmen der Altkleidersammlung umgesetzt und ausgebaut. Dabei werden die Elektrokleingeräte zusammen mit den Altkleidersäcken einmal monatlich bei den Haushalten abgeholt.

Optimierungspotenziale beim Containersystem werden vor allem in der Logistik gesehen. Um nur Standorte mit vollen Containern anzufahren, wäre es hilfreich die Füllstände der Container kontrollieren zu können (im Idealfall über eine Funkmeldung).

4.5 Nutzwertanalyse

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse zur Eignung von ergänzenden Sammelsysteme, die Anforderungen an die Sammlung von Elektroaltgeräten zu erfüllen. Dabei stellt das Ziel der Erhöhung der derzeitigen Sammelmenge ein wesentliches Kriterium dar. Die Anforderungen der WEEE-II-Richtlinie an die Sammlung werden als Referenzsystem betrachtet.

4.5.1 Anforderungen an die Sammlung durch die neue WEEE-II-Richtlinie

Um erhöhte Sammelergebnisse zu erreichen, werden den EU-Mitgliedsstaaten in Art. 5 der WEEE-II-Richtlinie diverse Vorgaben für die getrennte Sammlung von EAG gemacht. Zentrale Aspekte sind:

- Die kostenlose Rücknahme: Einrichtung von Systemen, die es den Endnutzern und den Vertreibern ermöglichen, diese Altgeräte „zumindest kostenlos“ zurückzugeben (Art. 5 Abs. 2 lit. a).
- Die 1:1 Rücknahme durch Vertreiber: Verpflichtung der Vertreiber beim Verkauf eines neuen Produkts Altgeräte kostenlos zurückzunehmen, „sofern das zurückgegebene Gerät gleichwertiger Art ist und dieselben Funktionen wie das abgegebene Gerät erfüllt hat. Die Mitgliedstaaten können von dieser Bestimmung abweichen, sofern sie sicherstellen, dass die Rückgabe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte für den Endnutzer hierdurch nicht erschwert wird, und dass sie für den Endnutzer weiterhin kostenlos ist“ (Art. 5 Abs. 2 lit. b).
- Die 0:1-Rücknahme durch Vertreiber: Die Vertreiber müssen „in Einzelhandelsgeschäften mit Verkaufsflächen für Elektro- und Elektronikgeräte von mindestens 400 m² oder in deren unmittelbarer Nähe für Endnutzer Einrichtungen zur Sammlung von sehr kleinen Elektro- und Elektronik- Altgeräten (keine äußere Abmessung über 25 cm) kostenlos und ohne Verpflichtung zum Kauf eines Elektro- oder Elektronikgeräts gleicher Art bereitstellen, sofern sich nicht aus einer Bewertung ergibt, dass bestehende alternative Sammelsysteme voraussichtlich mindestens ebenso wirksam sind“ (Art. 5 Abs. 2 lit. c).

Der europäische Gesetzgeber hat hiermit eine Orientierung für die als notwendig erachtete Sammelstellendichte bei EAG aus privaten Haushaltungen gegeben. Der Aufwand für den Endverbraucher darf nicht größer sein, als für den Neukauf eines EAG. Da der Aufwand durch die Entfernung zur Abgabestelle wesentlich bestimmt wird, ist dieser somit über die Dichte bzw. Anzahl der Wertstoffhöfe und betroffenen Handelsstandorte

bestimmt. Übertragen auf den Fernhandel kann dies dahingehend interpretiert werden, dass der Aufwand für den Endverbraucher nicht größer sein darf, als bei der Bestellung eines Neugerätes.

Zudem geht aus diesen Formulierungen hervor, dass die Sammlung von EAG beim Handel als Maßstab für alternative Sammelsysteme dient, die die Vorgaben der Erhöhung der Sammelmengen, der Kostenneutralität für den Verbraucher und der Mindestwirksamkeit mindestens genauso gut erfüllen müssen wie diese. Nur wenn eine Bewertung dies bestätigt, können Mitgliedsstaaten laut der Richtlinie von einer Rücknahmeverpflichtung für den Handel absehen. Die Bewertung der gleichen Wirksamkeit war aufgrund fehlender systematisch dokumentierter Erfahrungen mit alternativen Sammelsystemen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nicht möglich[42].

Als „bestehende alternative Sammelsysteme" werden hierbei Systeme betrachtet, die in der Praxis bereits erprobt oder angewandt werden. Unter „voraussichtlich ebenso wirksam" wird verstanden, dass mit den bestehenden alternativen Sammelsystemen etwa dieselbe Menge an EAG erfasst wird, wie dies mit einer Händlersammlung zu erwarten ist (siehe hierzu jedoch Fußnote 42). Unter „nicht erschwert" wird gefasst, dass der Aufwand für die Verbraucher, EAG zu entsorgen, nicht höher sein darf als bei der Händlersammlung.

Angesichts der lokalen Kontextgebundenheit von Sammelsystemen lässt ein absoluter Vergleich der Sammelmengen jedoch keine belastbaren Aussagen darüber zu, ob ein bestimmtes Sammelsystem tatsächlich effektiver ist als ein anderes. Zu beachten ist, dass ein System nicht überall die gleichen Ergebnisse liefert; der Erfolg eines Systems hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. Stärken einer mobilen Sammlung, die beispielsweise für langgestreckte, zersiedelte Gebiete relevant sind, fallen in räumlich konzentrierten Gebieten möglicherweise weniger ins Gewicht und dort sind kosteneffizientere Systeme möglich, die eine vergleichbare Mengenwirkung erzielen.

Demnach ist es für die vergleichende Bewertung von ergänzenden Sammelsystemen wichtig, über die Sammelmengen hinaus Kriterien zu identifizieren, die einen Vergleich und eine Bewertung der unterschiedlichen Systeme unter Berücksichtigung der regionalspezifischen Gegebenheiten zulassen.

4.5.2 Nutzwertanalyse: Beschreibung und Ziel

Eine Nutzwertanalyse (NwA) ist eine qualitative Bewertungsmethode, die innerhalb komplexer Entscheidungsprozesse eine systematische Entscheidungsvorbereitung herbeiführen und bei der Auswahl verschiedener Handlungsalternativen helfen soll. Ein Vorteil ist, dass sowohl monetäre als auch nicht-monetäre, bzw. quantitative als auch qualitative Größen in die Bewertung mit einfließen können, wenn eine Betrachtung von rein quantitativen Kriterien zur Entscheidungsfindung nicht als sinnvoll erachtet wird. Für jede Handlungsalternative wird dabei ein Nutzwert ermittelt, der in Abhängigkeit von den Präferenzen des Entscheidungsträgers den Grad der Eignung einer Alternative

[42] Systematisch stellen sich hier unter anderem das Problem, dass vergleichende Versuche sehr aufwendig wären (wenn überhaupt möglich), da das Handeln vergleichbarer Bezugsgruppen unter vergleichbaren Bedingungen untersucht werden müssten und eine detailliertes Monitoring externe Mengeneffekte ausschließen müsste (z. B. die Vermischung von Mengen mit Erzeugern außerhalb der Bezugsgruppe oder dem möglichen Abzug von Mengen aus anderen Sammelsystemen, durch die in der Summe keine Erhöhung der Sammelergebnisse erreicht werden könnte.

darstellt, die formulierten Ziele und Bedürfnisse zu erfüllen. Kennzeichnend für eine Nutzwertanalyse ist somit neben der Einbeziehung objektiver Informationen die Berücksichtigung von subjektiven Präferenzen und Einschätzungen. Diese Methode ist also von vornherein dazu angelegt, die jeder Entscheidungsfindung innewohnenden subjektiven Momente festzuhalten (Hoffmeister 2008).

Der Nutzwert ist dabei der subjektive Wert, der durch die Eignung zur Bedürfnisbefriedigung bestimmt wird. Ziel der Nutzwertanalyse ist es, verschiedene komplexe Lösungsalternativen in Abhängigkeit zu den Präferenzen des Entscheidungsträgers und dem daraus abgeleiteten systematischen Zielsystem in eine Rangfolge zu bringen. Bei der Nutzwertanalyse ist das Ergebnis der Gesamtnutzwert. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert entspricht am besten den formulierten Vorstellungen und Zielen.

Die Entwicklung der Nutzwertanalyse kann in 7 Teilschritte untergliedert werden, die sich auf eine Konzeptionsphase (Schritt 1-2), eine Bewertungsphase (3-4) und eine Ergebnisphase (5-7) verteilen (Grassinger & Salhofer 1998):

- Alternativenentwicklung
- Zielformulierung und Zielkriterienbestimmung
- Zielkriteriengewichtung
- Bewertung der Zielerreichung
- Nutzwertermittlung
- Alternativenreihung
- Ergebnisanalyse

Die Methode der Nutzwertanalyse wurde auf die Fragestellung der Verbesserung der Sammlung Elektroaltgeräte angewendet. Im Folgenden werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse erläutert.

4.5.2.1 Alternativenentwicklung zur ergänzenden Erfassung von Elektroaltgeräten

Der erste Schritt bei der Erstellung einer Nutzwertanalyse besteht in der Festlegung der Handlungsalternativen, die verglichen werden. Die Auswahl der konkret in dieser Nutzwertanalyse bewerteten Alternativen wurde auf Grundlage einer umfassenden Recherche (siehe u. A. die Ausführungen zu ergänzenden Systemen in Deutschland und ergänzenden Systemen in anderen Ländern, Kapitel 4.3) getroffen. Sie deckt ein breites Spektrum ergänzender Erfassungssysteme ab, die sich in der Erprobung oder bereits in der angewandten Praxis befinden. Folgende Sammelsysteme wurden für die vertiefende Untersuchung ausgewählt. Sie stehen jeweils exemplarisch als Vertreter für verschiedene Sammelkonzepte (eine Detailbeschreibung der Systeme folgt im weiteren Verlauf der Arbeit):

- **Depotcontainer** im öffentlichen Raum,
- **EAG-Tonne**: Haushaltsbezogene Monotonne,
- **Händlersammlung allgemein**: Sammelboxen im Handel in allen Geschäften,
- **Wertstoffmobile**,
- **Wertstoffhöfe**
- **Sammelboxen** in öffentlichen Gebäuden/am Arbeitsplatz

Referenzsystem: Händlersammlung nach dem novellierten ElektroG von 2015: Sammelboxen im Handel in Geschäften mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte > 400 m² (im Weiteren „**Händlersammlung > 400 m²**“ genannt)

Das Sammelsystem „Händlersammlung > 400 m²“ stellt die Referenzvariante dar und bezieht sich auf die gesetzliche Regelung des novellierten ElektroG, dass nur Geschäfte mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte > 400 m² zur Rücknahme (kleiner Elektroaltgeräte) verpflichtet sind. Die Einschränkung hinsichtlich der Verkaufsfläche für Elektrogeräte hat im Vergleich zu Alternative 3 „Händlersammlung gesamt“ bei einigen Kriterien Auswirkungen auf die Bewertung, und die beiden Varianten unterscheiden sich dadurch. Wo dies der Fall ist, wird dies explizit angemerkt und erläutert, ansonsten gelten die angegebenen Ausführungen für beide Varianten „Händlersammlung allgemein“ und „Händlersammlung > 400 m²“.

4.5.2.2 Zielformulierung und Zielkriterienbestimmung

Um Handlungsalternativen sinnvoll miteinander vergleichen zu können, bedarf es formulierter Ziele, welche die zu vergleichenden Alternativen erfüllen sollen und anhand derer der Erfolg/ Erfüllungsgrad der verschiedenen Systeme gemessen werden kann. Aus diesen Zielen lassen sich sodann Kriterien ableiten, von denen der Bewertende der Meinung ist, dass eine höchstmögliche Erfüllung dieser Kriterien einer höchstmöglichen Zielerfüllung entspricht.

Die zu erfüllenden Ziele werden aus der WEEE-II-RL , insbesondere der bereits in Kapitel 4.5.1 erläuterten Art. 5 Abs. 1 und 2 lit. a-c abgeleitet. Dort heißt es sinngemäß, dass in den EU-Mitgliedsstaaten Sammelsysteme eingerichtet werden müssen, die folgende Aspekte erfüllen sollen:

- Absolute Erhöhung der gesammelten Anteile von EAG,
- Zumindest kein erhöhter oder – besser noch – ein reduzierter Aufwand für die Verbraucher bei der Abgabe von EAG im Vergleich zur Rückgabe im Handel,
- Keine (Mehr)Kosten für die Verbraucher im Zuge der Abgabe von EAG.

Daraus ergibt sich, dass sich die Zweckmäßigkeit eines Sammelsystems

- sowohl auf dem **Nutzen** (die WEEE II nennt insbesondere Sammelmenge)
- als auch dem **Aufwand** (laut WEEE II insbesondere für den Verbraucher)

basierend bewerten lässt.

Aus diesen Zielen müssen konkrete Kriterien abgeleitet werden, um die Handlungsalternativen auf ihren Zielerfüllungsgrad hin bewerten zu können. Beim Zielerfüllungsgrad handelt es sich um einen dimensionslosen Wert, der ausdrückt, wie gut ein bestimmtes Ziel aus der Sicht des Bewertenden erreicht ist.

Die abgeleiteten Kriterien können sich gegebenenfalls nochmal in Unterkriterien aufgliedern, die das Oberkriterium konkreter beschreiben. Z. B. wird das Oberkriterium „Erreichbarkeit“ in dieser Nutzwertanalyse in die Unterkriterien „zeitliche Verfügbarkeit“, „Lokalisierungsaufwand“ und „Lage/zurückzulegender Weg“ unterteilt. Bei Bedarf können diese Unterkriterien auch noch in Subunterkriterien spezifiziert werden. Für diese Nutzwertanalyse entstanden auf diesem Wege fünf Oberkriterien mit insgesamt elf Unterkriterien und sechs Subunterkriterien (siehe Tabelle 48). Die Kriterienentwicklung

orientierte sich dabei teilweise eng an der Analyse des Entsorgungsverhaltens von Verbraucher bezüglich EAG (siehe Kapitel 5 dieses Berichts).

Tabelle 48: Bewertungs- und Vergleichskriterien für die Nutzwertanalyse

Nr.	Oberkriterium	Unterkriterium	Subunterkriterium
I	Erreichbarkeit der Sammelsysteme	Zeitliche Verfügbarkeit	
		Lokalisierungsaufwand	
		Lage/zurückzulegender Weg	
II	Akzeptanz beim Verbraucher	Erfassung verschiedener Altgerätearten	
		Transparenz über Verbleib	
		Datenschutz	
		Vermüllung des Standorts	
III	Diebstahlrisiko		
IV	Qualitativer Zustand der EAG	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	
		Fehlwurfquote	
V	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten für Anschaffung
			Flächenverfügbarkeit
			Rechtlicher Aufwand
		Erfassungsaufwand	Personal
			Sortierung
			Fläche

Mit Hilfe der Bewertungs- und Vergleichskriterien sollen einerseits signifikante Merkmale der Sammelsysteme identifiziert und andererseits ein systematischer Vergleich ermöglicht werden. Im Folgenden werden die Kriterien, ihre Bedeutung und Relevanz für die definierten Ziele genauer erläutert.

4.5.2.3 Oberkriterium I: Erreichbarkeit der Sammelsysteme

Das Kriterium der Erreichbarkeit der Abgabestelle für die Verbraucherinnen und Verbraucher ist für die Erhöhung der gesammelten Anteile von Elektroaltgeräten sehr relevant, da es die Verbraucherfreundlichkeit des Sammelsystems beeinflusst. Ein Unterkriterium hier ist die zeitliche Verfügbarkeit bzw. die Öffnungszeiten der Abgabestellen. Zusätzlich ist sie dadurch geprägt, wie hoch der Aufwand für die Abgabe des Altgerätes

ist. Aufwand entsteht daraus, herauszufinden, wo und wann Altgeräte abgegeben werden können (Kriterium „Lokalisierungsaufwand“) und daraus, wie weit der Weg zum Sammelsystem ist (Kriterium „Lage/zurückzulegende Wege“) und ob zusätzliche Wege gemacht werden müssen. So stellen z. B. viele Studien (siehe Kapitel 4.1) einen Zusammenhang zwischen der Entfernung des Wertstoffhofs und der Anzahl der Besuche dort fest (vgl. Taskanen 2012). Eine amerikanische Studie machte die Beobachtung, dass die Anzahl der Besuche beim Wertstoffhof mit jeder zusätzlich zurückzulegenden Meile um 1 % sank (Sidique 2008). Auch stellte diese Studie fest, dass die Entfernung zum Wertstoffhof insbesondere auf Vollzeitbeschäftigte bei der Auswahl des Wertstoffhofs einen großen Einfluss hat.

Somit wird ersichtlich, dass die Lage der Annahmestelle/n eine entscheidende Rolle spielt. Die Kontinuität der Erfassung ist für den Lokalisierungsaufwand ebenfalls ein charakteristisches Merkmal, da Nutzer sich oft und längerfristig an verfügbare Sammelstellen erinnern und der Aufwand für die Lokalisierung von Abgabemöglichkeiten sinkt. Die Lokalisierung der Sammelstellen und Zeiten kann z. B. über Abfallkalender oder durch Recherche im Internet erfolgen.

Der geringste Aufwand sowohl für Lokalisierung als auch für den Weg und somit die beste Erreichbarkeit ist zu erwarten, wenn die Sammelstelle durch die Endverbraucher im Alltag wahrgenommen wird und von ihnen dann erinnert wird, wenn ein Altgerät entsorgt werden muss. Dies wird z. B. erreicht, wenn die Sammelstellen auf den täglichen Wegen gesehen werden (beim Einkaufen bzw. am Arbeitsplatz bzw. auf dem jeweiligen Weg dorthin, ohne dass Mehraufwand entsteht). Als Weg mit sehr geringem Aufwand wird auch eingeschätzt, wenn einfache Gesetzmäßigkeiten zugrunde liegen, z. B. wenn an allen Orten, wo Elektrogeräte verkauft werden, auch Altgeräte zurückgegeben werden können. Das Kriterium der einfachen Erinnerbarkeit ist dann besonders schwierig zu erfüllen, wenn Altprodukte nicht täglich oder häufig anfallen, wie es bei EAG der Fall ist (z. B. im Vergleich zu Altpapier oder Altglas).

4.5.2.4 Oberkriterium II: Akzeptanz beim Verbraucher

Die Akzeptanz eines Sammelsystems beim Verbraucher beeinflusst maßgeblich das Ausmaß der Nutzung und somit den Sammelerfolg des Systems. Einfluss hierauf hat zum einen, wie viele verschiedene Arten von Wertstoffen ein Sammelsystem erfassen kann. Die Wahrscheinlichkeit für die Nutzung eines Systems steigt, wenn die Verbraucher dort sowohl große EAG wie Kühlschränke als auch kleine EAG wie Mobiltelefone und auch Gasentladungslampen, auf einmal abgeben können und somit der Aufwand für die Entsorgung gering gehalten wird.

Weiterhin hat die Transparenz des weiteren Verbleibs einen Einfluss, d. h. ob für die Verbraucher nachvollziehbar ist, was mit ihren Altgeräten nach der Erfassung passiert. Für Geräte, auf denen persönliche Daten gespeichert sind, gewinnt das Thema Datenschutz bei der Entsorgung an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wird der Umgang mit dem Thema Datensicherheit berücksichtigt, soweit systemspezifische Charakteristika vorliegen. Zudem wird davon ausgegangen, dass für die Akzeptanz eines Systems die Vermüllung eines Standortes eine Rolle spielt, da stark vermüllte Orte abschreckend auf die Verbraucher wirken können.

4.5.2.5 Oberkriterium III: Diebstahlrisiko

Bewertet wird das Diebstahlrisiko von EAG für ein System, sobald diese von den Verbrauchern abgegeben wurden. Viele Elektroaltgeräte besitzen einen positiven Marktwert aufgrund ihres Materialwertes und sind daher diebstahlgefährdet. Relevant ist dieses Kriterium auch im Hinblick auf die Sicherheit persönlicher Daten (siehe Kriterium Datenschutz) sowie des potenziellen illegalen Exportes.

4.5.2.6 Oberkriterium IV: Qualitativer Zustand der EAG

Für die potenzielle Vorbereitung zur Wiederverwendung, eine ordnungsgemäße Schadstoffentfrachtung und ggf. für die Behandlung der abgegebenen EAG spielt der Zustand der Altgeräte eine gewichtige Rolle. Berücksichtigt wird daher, inwieweit die Qualität durch die Art der Sammlung beeinflusst werden kann, wie beispielsweise durch Bruch nach Abwurf aus großer Höhe. Zudem wird analysiert, wie anfällig das jeweilige System für eine hohe Fehlwurfquote ist. Als Fehlwurfquote wird dabei jegliche Art von Einwurf gewertet, für die das System nicht vorgesehen ist. So kann z. B. die Qualität und dadurch die Behandlung der EAG durch Vermischung mit Restmüll erschwert und der Wert der gesammelten Fraktion gemindert werden. Auch steigt der Aufwand und somit die Kosten für die Sortierung mit steigender Fehlwurfquote.

4.5.2.7 Oberkriterium V: Wirtschaftlichkeit

Für einen Vergleich der ökonomischen Wirkungen der jeweiligen Systeme wird der zu erbringende Aufwand berücksichtigt. Ein Aspekt ist der finanzielle und organisatorische Aufwand für die Etablierung der Systeme. Darunter fallen Kosten für die Beschaffung und das Aufstellen von Sammelbehältnissen und der notwendigen Logistikinfrastruktur (Fahrzeuge, Transportbehälter etc.), das Einrichten von Annahmestellen und die damit einhergehende Bedarf an geeigneten Flächen sowie rechtliche Abstimmungsprozesse, die bei der Einführung solcher Systeme entstehen.

Als weiterer Aspekt wird der Erfassungsaufwand in Form der Betriebskosten und -organisation berücksichtigt (beispielsweise Logistik, Personal, Sortierung).

Idealerweise ließen sich auf diesem Wege für jedes Unterkriterium die jeweiligen Kosten in Euro pro gesammelter Tonne EAG darstellen (ggf. unter Berücksichtigung der Art der EAG hinsichtlich ihrer Gehalte an Schadstoffen und Wertstoffen, z. B. der RePro-Metalle) und so vergleichen. Aufgrund der schon erwähnten schwierigen Datenlage sowohl bezüglich der Mengen als auch der Kosten ist ein solcher Vergleich derzeit nicht durchführbar. Zudem muss berücksichtigt werden, dass Sammelmengen und Kosten stark vom jeweiligen Kontext und den örtlichen Gegebenheiten abhängen und somit ein solcher Vergleich nur bedingt aussagekräftig wäre. Zu berücksichtigen ist auch, dass sich einige Sammelsysteme, wie z. B. Depotcontainer, noch in der Erprobungs- und Experimentierphase befinden und sich daher noch keine idealtypischen Strukturen bilden konnten, die mit geringstmöglichen Kosten einhergehen. Daher werden für die Bewertung keine spezifischen Kosten pro System bzw. pro Tonne EAG genannt, sondern eine aufgrund von Praxiserfahrung und Literaturangaben getroffene Einschätzung mittels Ordinalskala.

4.5.2.8 Zielkriteriengewichtung

Jedem der Bewertungskriterien aus Tabelle 48 ist ein Gewichtungsfaktor zuzuordnen, der die Wichtigkeit dieses Kriteriums und die relativen Bedeutungsunterschiede zwischen den einzelnen Zielkriterien innerhalb einer Zielkriteriengruppe und zwischen den Zielkriteriengruppen beschreibt. Dies wird durch den Gewichtungsfaktor Gf ausgedrückt. Je höher dessen Wert ist, desto mehr Gewicht kommt dem Kriterium bei der Gesamtbetrachtung zu. Dabei müssen sich alle einzelnen Gewichtungsfaktoren auf einen Gesamtwert der gleichen Größe (hier 100) addieren. Die Gewichtungsfaktoren für die Oberkriterien müssen noch weiter auf die Unter- bzw. Subunterkriterien aufgeteilt werden, ohne dabei außer Acht zu lassen, dass diese Teilgewichtungsfaktoren zusammenaddiert den Gewichtungsfaktor des Oberkriteriums ergeben.

Die Ermittlung der Gewichtung ist ein subjektiver Vorgang und erfolgte im Rahmen der vorliegenden Nutzwertanalyse über einen Paarvergleich. Dabei wurden die Unter- bzw. Subunterkriterien der einzelnen Oberkriterien einander gegenübergestellt, im Hinblick auf die oben (Kapitel 4.5.2.2) formulierten Ziele auf ihre Wichtigkeit hin bewertet und nach folgendem Schema eine Punktzahl zugeordnet.

Tabelle 49: Bewertungsschema Paarvergleich

Punktezahl	Gegenüberstellung der Unter- bzw. Subkriterien
4	Kriterium A ist viel wichtiger als Kriterium B
3	Kriterium A ist etwas wichtiger als Kriterium B
2	Kriterium A ist genauso wichtig wie Kriterium B
1	Kriterium A ist etwas weniger wichtig als Kriterium B
0	Kriterium A ist viel unwichtiger als Kriterium B

Da sich nicht alle Oberkriterien sinnvoll miteinander vergleichen lassen, wurden drei verschiedene Gruppen gebildet:

- Die erste Gruppe vergleicht Kriterien, deren Erfüllung oder Nichterfüllung sich auf die Bereitschaft der Verbraucher auswirken könnten, EAG bei den jeweiligen Sammelsystemen abzugeben. Unter das Ziel „Quantitative Sammelmenge“ wurden die Oberkriterien „I Erreichbarkeit“, „II Akzeptanz“ und „III Diebstahlrisiko“ gefasst.
- Die zweite Gruppe bezieht sich auf das Ziel einer möglichst hochwertigen Weiterverwertung der EAG, und fasst das Oberkriterium „Qualitativer Zustand“.
- Die dritte Gruppe vergleicht die Aufwandskriterien von „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ der verschiedenen Sammelsysteme miteinander.

Die Punktzahl, die ein Kriterium so im Vergleich zu den anderen Kriterien innerhalb dieser Gruppe erreicht, wird mit der Gesamtpunktzahl dieser Gruppe in Relation gesetzt und so der Teilgewichtungsfaktor des Kriteriums ermittelt. Zudem lässt sich den einzelnen Gruppen ein variabler Gesamtgewichtungsfaktor zuordnen und somit die Gewichtigkeit einer Gruppe erhöhen oder verringern.

Tabelle 50: Gewichtung durch Paarvergleich

Kriterium	Erreichbarkeit - zeitliche Verfügbarkeit	Erreichbarkeit - Lokalisierungsaufwand	Erreichbarkeit - Lage/zurückzulegende Entfernung	Akzeptanz - Erfassung verschiedener Sammelgruppen	Akzeptanz - Transparenz über Verbleib	Akzeptanz - Vermüllung des Standorts	Datenschutz	Diebstahlrisiko	Summe je Kriterium	Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor Tf(%)[43]
Erreichbarkeit - zeitliche Verfügbarkeit	—	2	1	3	3	4	3	3	19		8,5
Erreichbarkeit - Lokalisierungsaufwand	2	—	1	3	4	4	3	3	20	50,0	8,9
Erreichbarkeit - Lage/zurückzulegende Entfernung	3	3	—	3	4	4	3	3	23		10,3

[43] Teilgewichtungsfaktor Tf entspricht Anteil von Summe je Kriterium an Gesamtsumme multipliziert mit Gewichtungsfaktor

Kriterium	Erreichbarkeit - zeitliche Verfügbarkeit	Erreichbarkeit - Lokalisierungsaufwand	Erreichbarkeit - Lage/zurückzulegende Entfernung	Akzeptanz - Erfassung verschiedener Sammelgruppen	Akzeptanz - Transparenz über Verbleib	Akzeptanz - Vermüllung des Standorts	Datenschutz	Diebstahlrisiko	Summe je Kriterium	Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor Tf(%)[43]
Akzeptanz - Erfassung verschiedener Sammelgruppen	1	1	1	—	3	3	2	3	14		6,3
Akzeptanz - Transparenz über Verbleib	1	0	0	1	—	3	2	2	9		4,0
Akzeptanz - Vermüllung des Standorts	0	0	0	1	1	—	1	1	4		1,8
Datenschutz	1	1	1	2	2	3	—	3	13		5,8
Diebstahlrisiko	1	1	1	1	2	3	1	—	10		4,5
Summe									112		50

4.5.2.9 Bewertung der Zielerreichung

Im nächsten Schritt wurden die Sammelsysteme daraufhin untersucht, inwieweit sie nach dem gegenwärtigen Stand der Technik und der praktischen Anwendung zur Zielerreichung beitragen. Dafür wurde jedem System zu jedem Kriterium ein Zielerreichungsfaktor Zf anhand einer metrischen Skala von 0 bis 10 zugeordnet, wobei 0 den schlechtesten und 10 den besten Wert darstellt. Idealerweise liegen für jedes Kriterium kardinalskalierte Daten vor. Diese quantitativen Größen lassen sich anhand einer Transformationsfunktion in die Zielerfüllungsfaktoren umsetzen.

Der Zielerreichungsfaktor Zf errechnet sich für kardinalskalierte Daten anhand dieser Formel:

$$Zf_n = \frac{Zf_{max} - Zf_{min}}{x_{max} - x_{min}}(x - x_{min})$$

Mit Zf_n = Zielerreichungsfaktor des Sammelsystems n
Zf_{max} = 10 (Maximal möglicher Wert des Zielerreichungsfaktors)
Zf_{min} = 0 (Minimal möglicher Wert des Zielerreichungsfaktors)
x_{max}, x_{min} = Maximal- und Minimalwerte der untersuchten Variable
x_n, = Wert der untersuchten Variable für Sammelsystem n

Die Werte für die Variable x werden für die einzelnen Sammelsysteme und Kriterien in den Tabelle 48 hergeleitet und die jeweilige Faktoren Zf_n berechnet.

Am Kriterium „zeitliche Verfügbarkeit“ wird diese Rechnung beispielhaft durchgeführt. Als Skala für die Zielerfüllungsgrade wurde für alle Kriterien der Wertebereich von 0 bis 10 festgelegt. Daher:

- Zf_{max} = 10
- Zf_{min} = 0

„x“ ist die „zeitliche Verfügbarkeit“ des Sammelsystems in der Woche, gemessen in Stunden. Es ist davon auszugehen, dass ein Sammelsystem mindestens 1 Stunde pro Woche geöffnet hat bzw. zugänglich ist und maximal an allen 7 Tagen der Woche jeweils von früh morgens bis spät abends, d. h. von 6 bis 22 Uhr (= 16 Stunden), zugänglich ist. Daher ergibt sich für das Kriterium „zeitliche Verfügbarkeit“:

- X_{max} = 112 h
- X_{min} = 1 h

Der Minimalwert und der Maximalwert müssen nicht unbedingt in den vorliegenden Werten der sieben betrachteten Sammelsystemen enthalten sein, da es durchaus denkbar ist, dass noch schlechtere Varianten möglich sind, die in diesem Spektrum nicht beinhaltet sind. So könnte man für das Maximum statt 112 h auch die volle Stundenanzahl einer Woche annehmen, so dass der Maximalwert 168 h betragen würde. Auch ist davon auszugehen, dass die zeitliche Verfügbarkeit für Sammelsysteme deutlich unter dem in diesem Spektrum enthaltenen Minimalwert von 19 h liegen kann. Daher wird hier ein Minimalwert von 1 h angenommen.

Der Zielerreichungsfaktor für die beiden Varianten der „Händlersammlung“ ergibt sich daher wie folgt:

$$Zf_{Händlersammlung} = \frac{10-0}{112-1}(66-1) = 5{,}85$$

Tabelle 51: Zeitliche Verfügbarkeit der Systeme pro Woche und Zielerreichungsfaktor Zf_n

Sammelsystem	Verfügbarkeit pro Woche in Stunden	Zielerreichungsfaktor Ziel Verfügbarkeit
Depotcontainer	112 h	10,0
EAG-Tonne	112 h	10,0
Händlersammlung gesamt	66 h	5,85
Händlersammlung > 400m²	66 h	5,85
Wertstoffmobil	20 h	1,71
Wertstoffhof	19,3 h	1,65
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	40 h	3,51

Somit ergibt sich für beide Varianten des Sammelsystems „Händlersammlung“ beim Kriterium „zeitliche Verfügbarkeit“ ein Zielerfüllungsfaktor von 6. Aufgrund der unzureichenden Datenbasis bzw. der Schwierigkeit, bestimmte Kriterien sinnvoll zu messen, kann die Anforderung der Kardinalskalierung allerdings nur für wenige Kriterien erfüllt werden. Dem Kriterium „Diebstahlrisiko“ lässt sich schwerlich eine für alle Sammelsysteme geltende Maßeinheit zuordnen, die vergleichbar wäre. Eine Möglichkeit wäre, die Häufigkeit von Diebstählen oder die gestohlene Menge in Kilogramm zu bewerten, ein Vergleich ergibt jedoch aufgrund der unterschiedlichen Sammelstruktur, Mengenerfassung und Flächendeckung der Sammelsysteme wenig Sinn. Zudem liegen solche Daten in nicht ausreichendem Maße vor. Möglich ist daher nur eine Schätzung auf Basis der bisher gemachten Praxiserfahrungen oder aufgrund von Studien, die Hinweise liefern. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Genauigkeit der Bewertung so möglicherweise eingeschränkt sein kann, da der subjektive Blickwinkel der Bewertenden verstärkt einfließt. Bei solchen Kriterien, wo keine kardinalskalierten Daten zur Verfügung stehen, sondern qualitative Ergebnisse bewertet werden, wurde daher eine Ordinalskala angewandt. Dafür wurde ein Bewertungsschema erstellt, anhand dessen der Grad, in dem das Ergebnis den angestrebten Zielen entspricht, für jedes Sammelsystem vom Bewertenden festgelegt und abgelesen werden kann. Je nachdem, ob das Kriterium auf den Zielerfüllungsgrad oder auf die Kosten bzw. den Aufwand hin abgefragt wird, wird eines der beiden folgenden Bewertungsschemas angewandt:

Tabelle 52: Bewertungsschema für Ermittlung des Zielerfüllungsgrades für Kriterien, für keine kardinalskalierten Daten verfügbar waren

Zielerfüllungsgrad	Zielerfüllungsfaktor Zf	Kosten/Aufwand
nicht erfüllt	0	unverhältnismäßig
gerade noch ausreichend	1	gerade noch nicht unverhältnismäßig
ausreichend	2	sehr hoch
ausreichend - befriedigend	3	hoch
befriedigend	4	eher hoch
befriedigend - gut	5	eher mittel
gut	6	mittel
gut - sehr gut	7	gering
sehr gut	8	sehr gering
sehr gut - überragend	9	keiner - minimal
überragend	10	keiner

4.5.2.10 Nutzwertermittlung

Anhand der Recherchen und Bewertung wurde für das jeweilige Kriterium und Sammelsystem ein Zielerfüllungsfaktor bestimmt. Zielerfüllungsfaktor Zf und Teilgewichtungsfaktor Gf ergaben zusammen multipliziert den Teilnutzwert des Kriteriums. Die Teilnutzwerte aller Kriterien addiert summieren sich dann zum Gesamtnutzwert der Sammelsysteme, die oben formulierten Ziele hinsichtlich der Fragestellung erfüllen zu können. Diese Wertsynthese dient dazu, die eindimensionalen Präferenzordnungen aller Alternativen bezüglich der Zielkriterien logisch und operational zusammenzufassen.

4.5.2.11 Alternativenreihung

Mit der Ermittlung der Gesamtnutzwerte für jede Handlungsalternative, die den Grad der Zielerfüllung angeben, können die Ergebnisse in eine Ordnung gebracht werden. An dieser Stelle können zwei verschiedene Betrachtungsweisen unternommen werden. Die eine Betrachtungsweise setzt die unterschiedlichen Handlungsalternativen in Beziehung zueinander und bringt sowohl den Gesamtnutzwert als auch die Teilnutzwerte der einzelnen Kriterien in eine Rangfolge untereinander. Auf diesem Weg lassen sich die besten Alternativen, sowohl was den Gesamtzielerfüllungsgrad als auch was die Teilkriterien betrifft, ermitteln und die eingangs gestellte Frage nach der bestmöglichen Zielerreichung beantworten. Allerdings gibt eine solche Rangfolge weder die Abstände untereinander wieder, noch sagt es zwingend etwas darüber aus, ob das beste Kriterium die Ziele auch wirklich zur Zufriedenheit erfüllt hat oder ob die anderen Varianten einfach noch unbefriedigender in der Zielerfüllung waren. Genauso verstellt es den Blick darauf, dass Alternativen, die auf den hinteren Rängen platziert sind, zwar etwas schlechter als

die anderen Alternativen abgeschnitten haben, aber nicht zwingend als schlecht zu bewerten sind. An dieser Stelle empfiehlt es sich deshalb zusätzlich, die Zielerfüllungen der einzelnen Alternativen unabhängig zu den anderen Handlungsvarianten in jedem Teilkriterium auf seine Zielerfüllung in Relation zum maximal möglichen Teilnutzen zu betrachten. Auf diesem Weg lassen sich Verbesserungspotenziale in den einzelnen Kriterien besser ausmachen

4.5.2.12 Ergebnisanalyse

Die Nutzwertanalyse wird mit einer Sensitivitätsanalyse abgeschlossen, die den Einfluss verschiedener Kriterien und ihrer Gewichtungen auf das Gesamtergebnis und entsprechender Änderungen bei den Eingangsdaten aufzeigt. Je geringer (d. h. unbeeinflusst von der Veränderung der Gewichtung) die Ergebnisvarianz ist, desto mehr ist ein Anspruch an eine Objektivität des Ergebnisses erfüllt.

4.5.2.13 Bewertung und Vergleich der Sammelsysteme

Auf Basis von Experteninterviews und vertiefenden Recherchen wurden in diesem Kapitel die ausgewählten Sammelsysteme (vgl. Tabelle 51) anhand der definierten Kriterien untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse je Kriterium sind nachfolgend beschrieben.

Für einige Sammelsysteme sind Erfahrungen aus der Nutzung für die Sammlung anderer Fraktionen verfügbar (z. B. Altglas, Altpapier). Sofern eine Übertragbarkeit dieser Informationen auf die Sammlung der EAG schlüssig ist, wurden diese hier als zusätzliche Anhaltspunkte betrachtet.

4.5.3 Beschreibung der Annahmen zu den Rahmenbedingungen der Sammlung

Die vorliegende Nutzwertanalyse kann unter Zugrundelegung verschiedener Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Je nachdem, welche Annahmen man trifft, ändern sich ggf. die Ergebnisse für die jeweiligen Sammelsysteme. So würden sich beispielsweise die Ergebnisse im Kriterium „Lage/zurückzulegende Entfernung“ deutlich unterscheiden, je nachdem ob man die Sammelsysteme im ländlichen oder urbanen Raum bewertet.

Die vorliegende Nutzwertanalyse wurde mit folgenden Annahmen durchgeführt:

- Ergänzendes Sammelsystem: In der Nutzwertanalyse wurde die Einführung zusätzlicher Sammelsysteme für Elektroaltgeräte betrachtet. (D. h. das Sammelsystem „Wertstoffhof“ bedeutet „zusätzliche Einrichtung von weiteren Wertstoffhöfen“)
- Anwendungsgebiet: Das Anwendungsgebiet der Sammelsysteme bezieht sich auf den urbanen Raum. Diese Annahme wurde getroffen, da mittlerweile knapp 75 % der deutschen Bevölkerung in Städten lebt (Statista 2014) und somit auch die überwiegende Menge an EAG dort anfällt.
- Lokalisierungsaufwand: Die Lokalisierung von Sammelstellen erfolgt überwiegend über das Internet, da heutzutage über 75 % der deutschen Bevölkerung das Internet nutzt und davon auszugehen ist, dass es das Hauptinformationsmedium unserer Zeit ist (Statista 2014a).
- Zustand: Die Sammelsysteme werden daraufhin bewertet, ob sie eine Wiederverwendung der EAG potenziell ermöglichen oder nicht. Die rechtlichen Rahmenbedingungen erfordern, dass eine mögliche Wiederverwendung der gesammelten

EAG geprüft wird, da es aus Sicht der Primärressourcenschonung die umweltfreundlichste Variante darstellt.

Um eine Erhöhung der Sammelergebnisse zu erreichen und die Anforderungen des Artikel 5.2 b und c der WEEE-Richtlinie zu berücksichtigen wird die Notwendigkeit einer deutlichen Erhöhung der Anzahl der Sammelstellen angenommen.

4.5.3.1 Kriterium I: Erreichbarkeit der Sammelsysteme

4.5.3.1.1 Zeitliche Verfügbarkeit

Ein Vergleich der Sammelsysteme untereinander zeigt deutliche Unterschiede in der diesbezüglichen Ausgestaltung der Systeme. Beim Unterkriterium der zeitlichen Verfügbarkeit wurde die Stundenanzahl abgeschätzt, die ein System den Verbrauchern in der Woche zur Verfügung steht. Dahinter steht die Annahme, dass ein Sammelsystem von Verbrauchern umso besser angenommen wird, desto flexibler der Zugang zu diesem ist. Insbesondere für Arbeitnehmer ist auch der Aspekt relevant, ob ein Sammelsystem am Wochenende zugänglich ist, da diese unter der Woche unter Umständen weniger Zeit haben, ihre Geräte zu entsorgen. Eine Entsorgung am Samstag ist bei Depotcontainern, der EAG-Tonne, bei beiden Varianten der Händlersammlung und dem Wertstoffhof möglich. Depotcontainer und EAG-Tonne stehen sogar auch sonntags zur Verfügung. Die Abgabe in öffentlichen Gebäuden wie Ämtern oder am Arbeitsplatz und das Wertstoffmobil stehen in der Regel am Wochenende nicht zur Verfügung, wobei beim Wertstoffmobil die Einschränkung zu machen ist, dass dies je nach Betreiber unterschiedlich sein kann.

Die zeitliche Verfügbarkeit kann bei der EAG-Tonne und den Depotcontainern variieren. Grundsätzlich könnte man davon ausgehen, dass sowohl die EAG-Tonne als auch Depotcontainer 24 h an 7 Tagen zugänglich sind, da sie entweder im eigenen Haus oder an öffentlich zugänglichen Plätzen stehen. Die erlaubte Einwurfzeit ist jedoch oftmals beschränkt. So ist an einigen Depotcontainern zu lesen, dass ein Einwurf aus Lärmschutzgründen nur wochentags zwischen 7 - 20 Uhr zulässig ist. Eine weitere mögliche Einschränkung besteht darin, dass viele örE im Idealfall befriedete Containerplätze wie nachts verschlossene Supermarktparkplätze bevorzugen, um zum einen eine gute Erreichbarkeit zu gewährleisten und zum andern die Gefahr der Beraubung oder des Vandalismus zu reduzieren. Dies begrenzt den Zugang aufgrund der Bindung an die Supermarktöffnungszeiten zusätzlich. Viele Container werden bzw. wurden jedoch auch an bereits existierenden Containerstandorten für Altglas oder Altpapier aufgestellt. Dieser Umstand wird dieser Analyse zugrunde gelegt. Um eine Anpassung an eine realistische Situation einfließen zu lassen, wird im untersuchten Sammelsystem „Depotcontainer“ davon ausgegangen, dass realistischer Weise kaum jemand zwischen 22 – 6 Uhr EAG entsorgt – aber auch, dass das strikte Einhalten der erlaubten Einwurfzeit nicht notwendigerweise befolgt wird und EAG auch am Wochenende entsorgt werden. Unter diesen Voraussetzungen erreichten die EAG-Tonne und die Depotcontainer die besten Werte mit einer Verfügbarkeit von 112h/Woche (7 Tage à 16 Stunden). Die EAG-Tonne ist in jedem Haus verfügbar und keinerlei Zugangsbeschränkungen unterlegen. Bei den Öffnungszeiten des Handels werden handelsübliche Öffnungszeiten von 9-20 Uhr zugrunde gelegt und verkaufsoffene Sonntage nicht berücksichtigt. Beide Varianten der Händlersammlung sind an diese Öffnungszeiten gebunden (6 Tage/Woche, 11 h/Tag) und erreichen dadurch nur einen durchschnittlichen Wert von 66h/Woche. Ebenso verhält es sich

bei der Sammlung in öffentlichen Gebäuden oder am Arbeitsplatz. Bei der Zugänglichkeit zum Arbeitsplatz wird eine Kernarbeitszeit von 8 Stunden angenommen und standardisierte Öffnungszeiten von öffentlichen Gebäuden zugrunde gelegt (8-12 Uhr und 13-17 Uhr). In der Regel sind diese Gebäude am Wochenende geschlossen, womit man somit auf eine Gesamtstundenzahl von 40h/Woche kommt (5 Tage/Woche, 8 h/Tag). Bei der Analyse der Öffnungszeiten von 3.213 Wertstoffhöfe in Deutschland wurde die durchschnittliche Öffnungszeit der Wertstoffhöfe mit 19,3 h/Woche errechnet (6 Tage/Woche, 3,21 h/Tag) (Quelle: eigene Erhebung; siehe Kapitel 4.2). Hervorzuheben ist, dass Wertstoffhöfe für Arbeitnehmer relativ gut verfügbar sind. So haben an den Samstagen des untersuchten Monats vormittags um 10 Uhr zwischen 82 % und 89 % der Wertstoffhöfe geöffnet. Die ermittelten Zielerreichungsfaktoren der einzelnen Systeme sind in Tabelle 53 dargestellt.

Tabelle 53: Bewertung des Unterkriteriums Zeitliche Verfügbarkeit (Wochenstunden) der Systeme

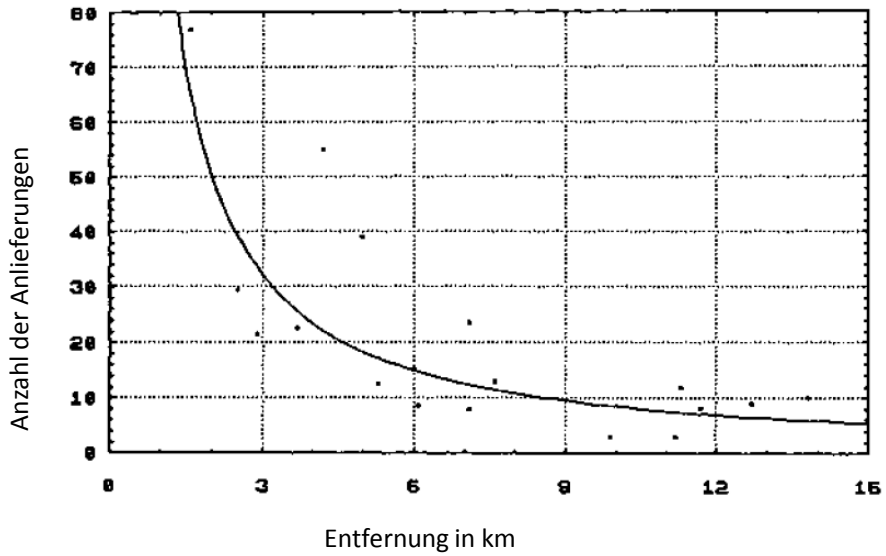
Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	7*16 = 112	10
EAG-Tonne	7*16 = 112	10
Händlersammlung gesamt	6*11 = 66	6
Händlersammlung > 400m^2	6*11 = 66	6
Wertstoffmobil	5*4 = 20	2
Wertstoffhof	6*3,21= 19,3	2
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	5*8 = 40	4

Die Verfügbarkeit des Wertstoffmobils unterliegt vielfältigen Einflussfaktoren und wird zudem dadurch geprägt, dass es sich um eine mobile Erfassung an unterschiedlichen Orten handelt. In dieser Analysewurde die Verfügbarkeit des Wertstoffmobils in München zugrunde gelegt. München unterhält im Innenstadtbereich zwei verschiedene Sammelmobile, von denen das eine den Nord-Westen und das andere den Süd-Osten der Innenstadt abdeckt. Diese Sammelmobile sind unter der Woche täglich unterwegs und jeweils im Schnitt ca. 4 Stunden an unterschiedlichen Standorten verfügbar (AWM 2014). Anzumerken ist, dass die Vielzahl der Sammelmobile in Deutschland vermutlich andere Verfügbarkeiten haben werden. Das Beispiel München zeigt jedoch, dass es in der Praxis auch möglich ist, eine regelmäßige Bereitstellung zu gewährleisten. In Hinsicht auf dieses Kriterium wird dem Wertstoffmobil für die Sammlung von EAG der Zielerfüllungsfaktor 2 zugeordnet.

4.5.3.1.2 Lage/zurückzulegender Weg

Für klassische Sammelfraktionen (Altglas, Altpapier) wurde bei der Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Nutzung von Sammeleinrichtungen und Entfernung ein sehr deutlicher Effekt der Nähe von Abgabemöglichkeiten festgestellt (Gallenkemper & Middendorf 2013). Abbildung 37 bildet die Ergebnisse einer Umfrage unter Wertstoffhofbesuchern ab und zeigt, dass Wertstoffhöfe deutlich öfter angesteuert wurden, je kürzer der zurückzulegende Weg dorthin ist.

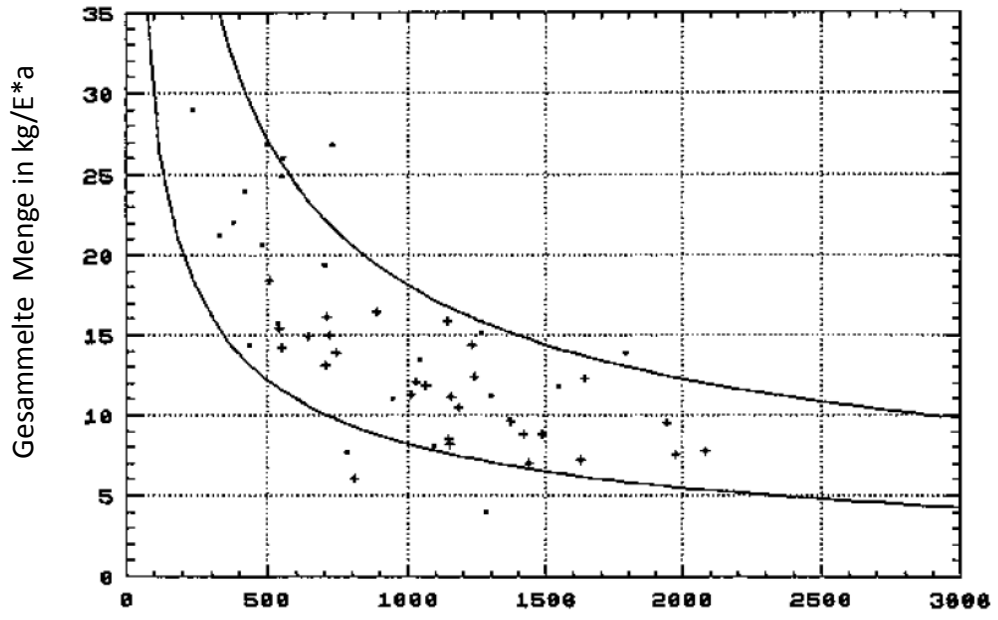
Abbildung 37: Abhängigkeit von Entfernung der Abgabestelle und Anzahl der Anlieferungen in %



Quelle: Gallenkemper & Middendorf (2013)

Auch zwischen der Containerdichte - und somit einer geringeren Entfernung zwischen den einzelnen Sammelstellen – und der gesammelten Menge besteht eine positive Korrelation. Diese wurde für die Sammlung von Altglas untersucht. Der Zusammenhang ist in Abbildung 38 dargestellt.

Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Containerdichte und Altglassammelmengen



Quelle Gallenkemper Middendorf (2013)

Hier wird eine gute Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf RePro-Geräte gesehen, da die Motivatoren und Hemmnisse im Verbraucherverhalten in diesem Bereich vergleichbar sind.

Dem Kriterium „Lage/zurückzulegender Weg“ kommt aufgrund seines Einflusses auf das Abgabeverhalten eine entsprechend hohe Bedeutung zu. Zudem ist relevant, ob es sich bei den zurückzulegenden Wegen um solche handelt, die im normalen Alltag sowieso gemacht werden oder um zusätzliche Wege, die alleine mit dem Ziel absolviert werden, EAG abzugeben. Dementsprechend wurden die Teilnutzwerte für dieses Kriterium unter dieser Vorgabe bewertet. Nicht-zusätzliche Wege werden nur mit halber Wertigkeit in die Analyse mit einbezogen. Geht man beispielsweise davon aus, dass der nächstgelegene Depotcontainer ca. 2 km entfernt liegt, wird dieser Wert halbiert, da Depotcontainer oftmals an bereits existierenden Containerplätzen für Altglas, Altpapier oder Altkleider bzw. bei Supermärkten stehen und davon ausgegangen werden kann, dass diese Plätze auch so regelmäßig angesteuert werden. Ähnlich verhält es sich bei den Sammelsystemen „Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz“ und bei beiden Varianten der „Händlersammlung“. Als nicht mehr akzeptabler zurückzulegender Weg für die Abgabe ressourcenrelevanter RePro-Geräte wurden 10 km angenommen und der Berechnung somit als X_{min} zugrunde gelegt.

In Deutschland gibt es laut BV Glas bundesweit 300.000 Altglascontainer (BV Glas 2014) und somit ein potenziell dichtes Netz an möglichen Depotcontainerstandorten. Hinzu kommen potenzielle Plätze auf Supermarktparkplätzen, so dass die Entfernungen zu den Containern sehr gering sind.

Die Sammlung der EAG über Sammelboxen im Handel konzentriert sich räumlich in Einkaufsbereichen wie beispielsweise dem Innenstadtbereich oder Einkaufszentren. Dabei ist auch anzumerken, dass der Handel neben dem spezialisierten Elektrofachhandel auch Geschäfte umfasst, bei denen Elektrogeräte nur ein Teilsegment darstellen und es damit eine sehr breit gestreute potenzielle Erfassungsstruktur gibt. Die Verkaufsfläche für Elektrogeräte in dieser Art von Geschäften ist in den meisten Fällen kleiner als 400 m^2, so dass diese Geschäfte nur bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ relevant sind. Bei der Variante „Händlersammlung > 400 m^2“ reduziert sich die Anzahl der Sammelstellen deutlich und führt zu größeren Entfernungen zu der nächstgelegenen Abgabestelle. Nach Angaben des HDE aus dem Jahr 2012 gab es zu dem Zeitpunkt in Deutschland in den Bereichen Elektrofachhandel, Baumärkte, große Verbrauchermärkte und Warenhäuser grob geschätzt 40.700 Geschäfte, die Elektrogeräte vertreiben, davon jedoch nur ca. 7.500, die über eine Verkaufsfläche für Elektrogeräte von mehr als 400 m^2 verfügen[44].

Die Einzelhandelsstandorte mit einer Verkaufsfläche von mehr als 400 m^2 für Elektrogeräte unterteilen sich dabei wie folgt auf verschiedene Geschäftsformate.

[44] Persönliche Kommunikation Sollbach (2012)

Tabelle 54: Schätzung des HDE bzgl. der Anzahl der in Deutschland von der 0:1-Rücknahme gemäß WEEE-II-RL betroffenen Handelsgeschäften

Betroffene Formate	Ungefähre Zahl der betroffenen Geschäfte	Methodik der Datenerhebung des HDE
Elektrofachhandel	5.200	Laut Umsatzsteuerstatistik des Statistischen Bundesamtes gab es 2010 (mit zeitlichem Versatz) insgesamt 38.211 steuerpflichtige Betriebe (ohne Filialstandorte) in den Branchen Einzelhandel mit Computern, peripheren Einheiten und Software (10.970), Einzelhandel mit Telekommunikationsgeräten (3.667), Einzelhandel mit Geräten der Unterhaltungselektronik (7.258), Einzelhandel mit Foto- u. optischen Erzeugnissen (ohne Augenoptiker, 2.281), Einzelhandel mit elektrischen Haushaltsgeräten (13.142) und Einzelhandel mit Beleuchtungsartikeln (893). Bei einer Verkaufsfläche ab 400 m^2 ergeben sich bestimmte Umsatzgrößenklassen. Zieht man die aus der Umsatzsteuerstatistik des Statistischen Bundesamtes grob heraus, kommt man auf insgesamt etwa 4.700 Unternehmen: Einzelhandel mit Computern, peripheren Einheiten und Software (1.100), Einzelhandel mit Telekommunikationsgeräten (300), Einzelhandel mit Geräten der Unterhaltungselektronik (1.100), Einzelhandel mit Foto- u. optischen Erzeugnissen (ohne Augenoptiker, 100), Einzelhandel mit elektrischen Haushaltsgeräten (2.000) und Einzelhandel mit Beleuchtungsartikeln (100). Unter den Unternehmen befinden sich auch filialisierte Einzelhändler. Die relevantesten drei darunter (Media Markt und Saturn, Promarkt und Conrad) kommen insgesamt auf 500 Standorte
Baumärkte	1.600	Nach der Definition des Branchenverbands BHB (Bundesverband Deutscher Heimwerker-, Bau- und Gartenfachmärkte e. V.) muss ein Baumarkt mindestens 1.000 Quadratmeter Verkaufsfläche bieten und über eine bestimmte Warenklassifikation verfügen, um als solcher vom BHB anerkannt zu sein. Nach dieser Definition gab es 2005 in Deutschland 2.520 Baumärkte. Seitdem wird die Zahl laut HDE nicht signifikant gestiegen, sondern eher zurückgegangen sein. Nimmt man grob an, dass zwei Drittel der Baumärkte Elektrogeräte auf mehr als 400 m^2 anbieten, dann ist die Gesamtzahl hier etwa 1.600.

Betroffene Formate	Ungefähre Zahl der betroffenen Geschäfte	Methodik der Datenerhebung des HDE
Warenhäuser	200	Zum Zeitpunkt der Untersuchungen bestanden zwei große Warenhausketten in Deutschland, die neben Textilien auch Elektrogeräte in den Abteilungen Elektro, Spielwaren, Sport und Schreibwaren anbieten. Die Anzahl der Standorte lag zusammen bei knapp 200.
SB-Warenhäuser	500	SB-Warenhäuser verfügen über eine Gesamtverkaufsfläche von mehr als 5.000 m². Da das Kernsortiment dort Lebensmittel sind, kann man davon ausgehen, dass nur solch große Häuser über eine VK-Fläche für Elektrogeräte von mehr als 400 m² verfügen. Grob geschätzt gibt es in Deutschland etwa 500 Häuser in dieser Größenordnung.

Quelle: persönliche Kommunikation Sollbach (2012)

Die Anzahl Sammelstellen reduziert sich mit einer Beschränkung auf Geschäfte mit einer Verkaufs- oder Lagerfläche für Elektrogeräte > 400 m² auf ca. ein Fünftel der möglichen Sammelstellen. Häufig liegt der Handel im Bereich der Wege, die die Verbraucher regelmäßig, teilweise mehrmals pro Woche, haben, sodass kein zusätzlicher Wegeaufwand besteht.

Der Verband kommunaler Unternehmen e.V. Abfallwirtschaft und Stadtreinigung VKS hat Mitgliedsbetriebe unter anderem zu Flächenabdeckung befragt (16 Betriebe mit jeweils mehreren Wertstoffhöfen). Diese Wertstoffhöfe decken im Durchschnitt eine Fläche von 72 km²/Wertstoff-Hof ab (Schäfer 2012). Somit ist anzunehmen, dass Wertstoffhöfe zumeist in deutlich größerer Entfernung voneinander liegen, außerdem befinden sie sich oft in Gewerbegebieten und somit selten auf Alltagswegen, so dass die zurückzulegenden Wege zusätzlich erbracht werden müssen, wenn der WS-Hof nicht sowieso wegen anderer Abfälle angefahren werden muss (dies setzt entsprechende Lagerkapazität im Haushalt für die EAG voraus). So gaben in einer Umfrage unter Wertstoffhofbesuchern nur 25 % an, dass sie diesen Besuch mit anderen Tätigkeiten verbinden (Thäter 1989, in Gallenkemper & Middendorf 2013). Dieser erhöhte Aufwand und die vergleichsweise weiten Wege führen zu einem geringen Wert bei diesem Kriterium.

Zu öffentlichen Gebäuden bzw. zum eigenen Arbeitsplatz wird ein etwas längerer Weg angenommen. Diese Strecken werden für die Bewertung nicht als zusätzlich aufgefasst.

Das Wertstoffmobil hat den Nachteil der geringen zeitlichen Verfügbarkeit, jedoch den Vorteil der Mobilität. Mit der mobilen Erfassung an unterschiedlichen Orten können die Verbraucher relativ haushaltsnah ihre EAG abgeben bzw. an den Orten, die sie sowieso aufsuchen (z. B. Wochenmarkt). Jedoch können die Wertstoffmobile aufgrund ihrer beschränkten Anzahl nur an einer eingeschränkten Anzahl von Punkten zur Verfügung stehen, was die Bewertung negativ beeinflusst und zu einer ähnlichen Bewertung wie bei

öffentlichen Gebäuden/Arbeitsplatz führt. Durch entsprechende Wahl der Aufstellpunkte kann erreicht werden, dass die Wege nicht als zusätzliche Wege zurückgelegt werden müssen.

Tabelle 55: Bewertung des Unterkriteriums Lage/zurückzulegende Wege (km)

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	2 = 1 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	9
EAG-Tonne	0 = 0	10
Händlersammlung gesamt	Bei 1:1-Rückgabe: 2 = 1 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	9
	Bei 0:1-Rückgabe: 7 = 4 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	6
Händlersammlung > 400 m^2	Bei 1:1-Rückgabe und 0:1-Rückgabe: 7 = 4 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	6
Wertstoffmobil	4 = 2 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	8
Wertstoffhof	7 = 7	3
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	4 = 2 (Weg wird als nicht zusätzlicher Weg bewertet und halbiert)	8

4.5.3.1.3 Lokalisierungsaufwand

Der Lokalisierungsaufwand für Depotcontainer ist für die meisten Endverbraucher gering, wenn es sich um Standorte handelt, die aufgrund der Altglas-, Altpapier- oder Verpackungssammlung bekannt sind oder in der Nähe von Supermärkten liegen. Solche Standorte lassen sich auch ohne viel Aufwand im Internet recherchieren.

Der Lokalisierungsaufwand in Geschäften ist für die Verbraucher gering, wenn durch eine Sichtbarkeit der Sammelboxen und Hinweisschilder im Handel die Abgabemöglichkeit in Erinnerung ist. Zudem lassen sich entsprechende Geschäfte schnell – beispielsweise über das Internet - lokalisieren oder sind den Verbrauchern durch alltäglich zurückgelegte Wege und einen regelmäßigen Besuch bereits bekannt. Im Vergleich zur „Händlersammlung gesamt“ erhöht sich der Lokalisierungsaufwand bei der Variante „Händlersammlung > 400 m^2“ jedoch, da die Anzahl der Sammelstellen geringer ist und es für die Verbraucher zudem einen Aufwand darstellt – wenn es ihnen überhaupt möglich ist - zu identifizieren, ob ein Geschäft das Kriterium der Mindestverkaufsfläche für Elektrogeräte erfüllt.

Die EAG-Tonne ist direkt an die Haushalte angeschlossen bzw. befindet sich im Wohnkomplex bei den restlichen Abfallbehältern. Daher besteht kein Lokalisierungsaufwand.

Das Wertstoffmobil erhält bei diesem Kriterium eine unterdurchschnittliche Bewertung. Dies liegt an mehreren Punkten. Zum einen erfüllt es nicht das Kriterium der einfachen Erinnerbarkeit, da es Verbrauchern durch wechselnde Standorte schwerer fällt, dieses Sammelsystem im Alltag wahrzunehmen und sich daran zu erinnern, wenn ein EAG abgeben werden muss. Durch die wechselnden Standorte geht zum anderen ein erhöhter Aufwand einher herauszufinden, wann und wo das Mobil zur Verfügung steht. Wenn die Endnutzer EAG entsorgen wollen, müssen Zeit und Ort der Sammelstelle recherchiert und ggf. die eigenen Wege auf die Verfügbarkeit der Sammelstelle abgestimmt werden. Dieser Aufwand kann vermindert werden, wenn das Anfahren der jeweiligen Standorte einem einfach nachzuvollziehendem Muster folgt, z. B. jeden 1. Montag im Monat an derselben Stelle o. Ä. Die Abfallwirtschaftsbetriebe München, die zwei verschiedene Routen mit Wertstoffmobilen für die Innenstadt betreiben (Tour Nord-West und Tour Süd-Ost) stehen sogar jeden Wochentag am gleichen Standort (AWM 2014). Eine solche Kontinuität erhöht die Wahrnehmung durch die Verbraucher und reduziert den Lokalisierungsaufwand.

Tabelle 56: Bewertung des Unterkriteriums Lokalisierungsaufwand

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	sehr gering	8
EAG-Tonne	keiner	10
Händlersammlung gesamt	keiner - minimal	9
Händlersammlung > 400 m^2	mittel	6
Wertstoffmobil	eher hoch	4
Wertstoffhof	mittel	6
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	gering	7

Wertstoffhöfe liegen selten auf Alltagswegen und werden daher von Verbrauchern weniger gut wahrgenommen und ihre Lage daher selten erinnert. Wenn EAG zur Abgabe anfallen, müssen die Standorte daher in den meisten Fällen zunächst lokalisiert werden. Dies führt zu einer durchschnittlichen Bewertung bei diesem Kriterium.

Sammelstellen in öffentlichen Gebäuden oder an Arbeitsplätzen in Bürogebäuden haben den Vorteil, dass sie von vielen Menschen relativ regelmäßig oder sogar täglich angesteuert werden und daher die Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmung und Erinnerung erhöht wird. Nachteilig ist jedoch, dass die Behälter nicht im öffentlichen Raum stehen und somit nur von den Personen wahrgenommen werden können, die die Gebäude betreten.

4.5.3.1.4 Zwischennutzwert „I Erreichbarkeit“

Es wird deutlich, dass die Sammelsysteme hinsichtlich ihrer Erreichbarkeit der Sammelstruktur und des Aufwandes (Lokalisierungsaufwand, Wegeaufwand) stark differieren. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse für dieses Oberkriterium sind in Abbildung 39 dargestellt.

Abbildung 39: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Erreichbarkeit bei Gewichtung 100 %

Kriterien		Gewichtung (%)		Depotcon-tainer		EAG-Tonne		Händler-sammlung gesamt		Händler-sammlung > 400 m²		Wertstoff-mobil		Wertstoff-hof		Sammlung Arbeits-platz/ öff. Gebäude	
		Gf (%)	TGf (%)	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN
I Erreich-barkeit	Zeitliche Verfügbarkeit	100	25	10	250	10	250	6	150	6	150	2	50	2	50	4	100
	Lokalisierungsaufwand		25	8	200	10	250	9	225	6	150	4	100	6	150	7	175
	Lage/zurückzulegender Weg		50	9	450	10	500	9	450	6	300	8	400	3	150	8	400
Zwischennutzwert I					900		1.000		825		600		550		350		675

Quelle: eigene Darstellung

4.5.3.2 Akzeptanz bei den Verbrauchern

4.5.3.2.1 Erfassung verschiedener Altgerätearten

Die Akzeptanz der Verbraucher für die unterschiedlichen Sammelsysteme unterscheidet sich stark und wird maßgeblich durch die Nutzung der jeweiligen Systeme reflektiert. Ein beeinflussender Faktor ist dabei das Kriterium, wie viele verschiedene Altgerätearten bei dem Sammelsystem abgegeben werden können. Idealerweise kann ein Sammelsystem sowohl Großgeräte wie Kühlschränke oder Waschmaschinen, kleine Altgeräte wie Laptops oder Toaster, und schadstoffhaltige Gerätegruppen wie Gasentladungslampen entgegennehmen. Dadurch reduziert sich der Aufwand für die Verbraucher, da sie nur einen Weg zum Entsorgungsstandort zurücklegen müssen. In diesem Projekt wurde untersucht, ob eine Sammelsystem Altgeräte dieser drei Gerätearten (Großgeräte, Kleingeräte und Gasentladungslampen)erfassen. Zu beachten ist hier, dass sich die Bewertung für die Nutzwertanalyse nicht an den Sammelgruppen 1 bis 5 orientiert. Im Rahmen dieses Projekts wurden mögliche Effekte durch die Bündelung von EAG mit anderen Wertstoffströmen nicht berücksichtigt.

Abbildung 40: Beispiel für eine Sammlung von kleinen EAG im Handel



Quelle: www.take-e-way.de

Beim Wertstoffmobil können in der Regel sowohl kleine Elektroaltgeräte abgegeben werden als auch schadstoffhaltige Altgeräte, jedoch keine Elektrogroßgeräte.

In die gängigen Depotcontainer können je nach Beschaffenheit und Größe der Einwurfklappe auch etwas größere EAG eingeworfen werden wie Computertower oder Mikrowellen, jedoch keine großen Geräte wie Waschmaschinen. Bestimmte schadstoffhaltige Altgeräte dürfen nicht eingeworfen werden.

Ähnliches gilt für die EAG-Tonne, die nur für Elektrokleingeräte konzipiert ist.

Die Sammlung in öffentlichen Gebäuden erfolgt oft über Sammelboxen. Diese kann sowohl für Gasentladungslampen als auch für Elektrokleingeräte konzipiert. Solche Boxen sind auch in Geschäften, z. B. im Eingangsbereich von Supermärkten zu finden. Bei der Händlersammlung muss bei der Frage, wie viele Gerätearten abgegeben werden können, nach der Art und Größe des Geschäfts differenziert werden. Alle Elektrogeräte müssen laut dem novellierten ElektroG von 2015 bei Neukauf eines Produkts unabhängig der Größe in allen Geschäften mit einer Verkaufsfläche für Elektrogeräte > 400 m² zurückgegeben werden können, sofern „der gleichen Geräteart“ entspricht und „im Wesentlichen die gleichen Funktionen wie das neue Gerät erfüllt“ (sogenannte 1:1-Rücknahme). Somit wäre eine Abgabe von allen drei untersuchen Gerätearten möglich. In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass sich differenzierte Erfassungsstrukturen für Groß- und für Kleingeräte etablieren werden. Einzelhandelsgeschäfte mit einer Verkaufsfläche von mindestens 400 m² sind zudem verpflichtet, Elektrokleingeräte, deren äußere Abmessung 25 cm nicht überschreiten, auch ohne einen Neukauf zurückzunehmen. Bei dieser 0:1-Rücknahme ist somit nur eine gesetzliche Rücknahmeverpflichtung von zwei von drei untersuchten Gerätearten eingeschlossen.[45]

Bei klassischen Wertstoffhöfen können in der Regel alle Arten von Geräten abgegeben werden, was zu einer entsprechend sehr guten Bewertung führt. Außerdem decken sie zusätzlich ein anderes und größeres Materialspektrum ab, so dass die Systemwahl für die Abgabe von Elektrokleingeräten auch davon abhängt, welche Fraktionen noch von den Verbrauchern abgegeben werden müssen.

Tabelle 57: Bewertung des Unterkriteriums Erfassung verschiedener Altgerätearten

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	1	3
EAG-Tonne	1	3
Händlersammlung gesamt	1:1-Rücknahme: 3	10
	0:1-Rücknahme: 2	7
Händlersammlung > 400 m²	1:1-Rücknahme: 3	10
	0:1-Rücknahme: 2	7
Wertstoffmobil	2	7
Wertstoffhof	3	10
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	2	7

[45] Ggf. werden zusätzlich freiwillige Rücknahmen durch die Geschäfte angeboten, z. B. die Rücknahme von Altgeräten bei Auslieferung. Dabei fallen aber i.d.R. Kosten für den Transport des Altgeräts an.

4.5.3.2.2 Transparenz über Verbleib

Das Kriterium „Transparenz über den Verbleib“ ist nur bedingt von der Beschaffenheit des Sammelsystems abhängig, sondern vielmehr von den dahinter stehenden Akteuren. Bei den hier betrachteten Sammelsystemen kann daher keine Differenzierung in der Bewertung erfolgen. Die in den Medien veröffentlichten Berichte über ungewollte Verbleibswege (auch über den illegalen Export) führen zu einer Bewertung leicht unterhalb des Optimums.

Tabelle 58: Bewertung des Unterkriteriums Transparenz über Verbleib

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	sehr gut	8
EAG-Tonne	sehr gut	8
Händlersammlung gesamt	sehr gut	8
Händlersammlung > 400 m^2	sehr gut	8
Wertstoffmobil	sehr gut	8
Wertstoffhof	sehr gut	8
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	sehr gut	8

4.5.3.2.3 Datenschutz

Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien gewinnt das Thema Datenschutz bei der Entsorgung zunehmend an Bedeutung. Das betrifft einerseits Informationen aus der unmittelbaren Privatsphäre, aber auch sensible Daten wie Passwörter. Personenbezogene Daten müssen daher entweder durch eine mechanische Zerstörung des Datenträgers (z. B. im Schredder) oder durch sichere Löschprogramme entfernt werden. Solche Programme können zwar kostenfrei aus dem Internet heruntergeladen werden, erfordern aber in der Regel vertiefte Computerkenntnisse. Die Verunsicherung der Bürger über den Umgang mit ihren Daten, wie er sich beispielsweise in der zunehmenden Anzahl von Rückfragen bei der Verbraucherschutzzentrale widerspiegelt[46], wird zunehmend zu einem Hemmnis für die Abgabe solcher Altgeräte in die Sammlung und trägt zur Hortung im Haushalt bei.

Im Bereich der Sammelsysteme für diese IKT-Geräte wird dem Thema Datenschutz von den verschiedenen Akteuren sehr unterschiedliche Bedeutung beigemessen. In der Regel wird davon ausgegangen, dass die Letztnutzer sich selber um die Löschung ihrer Daten kümmern sollten, bevor sie ihre Altgeräte in eine Sammlung abgeben.

Die Sicherheit der Daten gewinnt auch an Bedeutung, wo das Sammelsystem die EAG auf eine Wiederverwendung prüft oder wo keine Maßnahmen zur Diebstahlsicherung vorliegen. Sammelsysteme, bei denen Altgeräte persönlich an Mitarbeiter übergeben werden – wie das Wertstoffmobil oder der Wertstoffhof – haben theoretisch den Vorteil, dass bei Abgabe verbliebene Daten in Anwesenheit der Verbraucher gelöscht und diesen

[46] Vgl. Interview Heldt.

so die Sorgen vor Missbrauch genommen werden können. Dieser Service wird beispielsweise vom Wertstoffmobil in Herford gegen ein Arbeitsaufwandentgelt in Höhe von 9,50 Euro angeboten. Diese Option wird kaum in Anspruch genommen. Auch andere Sammelsysteme können im Nachhinein eine Datenlöschung vornehmen, jedoch kann es den Verbrauchern an Gewissheit fehlen, dass dies auch wirklich vollzogen wird und könnte sie daher von einer Abgabe abhalten.

In Bezug auf die hier analysierten Behältersysteme kann gefolgert werden, dass die Akzeptanz für Entsorgungswege bei ungesicherten Behältersystemen zumindest für die EAG gering ist, die sensible Daten enthalten können. Dies sind in der Regel auch die EAG, die besonders ressourcenrelevant sind (IKT-Geräte). Aufgrund der unsicheren Datenlage wird eine Ausdifferenzierung nach den Sammelsystemen nicht vorgenommen und ein durchschnittlicher Wert für alle Systeme angenommen, da bei keinem der Systeme ein überdurchschnittlich sicherer Umgang bezüglich des Thema Datenschutz bekannt ist.

Tabelle 59: Bewertung des Unterkriteriums Datenschutz

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	befriedigend - gut	5
EAG-Tonne	befriedigend - gut	5
Händlersammlung gesamt	befriedigend - gut	5
Händlersammlung > 400 m^2	befriedigend - gut	5
Wertstoffmobil	befriedigend - gut	5
Wertstoffhof	befriedigend - gut	5
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	befriedigend - gut	5

4.5.3.2.4 Vermüllung der Standorte

Stark vermüllte Standorte könnten Verbraucher davon abhalten, diese aufzusuchen und ihre Geräte dort abzugeben. Zudem führt es aufgrund des negativen Erscheinungsbildes und der Mehrkosten für die Entsorgung generell zu einer verminderten Akzeptanz bei Bürgern und Entscheidern. Allgemein ist zu sagen, dass die Vermüllung umso geringer ist, je mehr Gerätearten ein Sammelsystem erfassen kann und wenn die Systeme beaufsichtigt werden.

Einmal mehr führt daher die Personalpräsenz beim Wertstoffmobil dazu, dass dieses Sammelsystem in diesem Kriterium sehr gut abschneidet. Unsachgemäße Abgabe von EAG kann durch die geschulten Mitarbeiter unterbunden werden bzw. den Verbrauchern direkt erklärt werden, wo sie die Geräte abgegeben können, falls dies beim Wertstoffmobil nicht möglich ist.

Die Klappengröße spielte bei Depotcontainern eine wesentliche Rolle bei der Vermüllung der Standorte: Können größere EAG nicht über den Container entsorgt werden, ist häufig zu beobachten, dass sie in unmittelbarer Nähe der Container abgestellt werden. Auch kommt es auf die Häufigkeit der Leerung an. Überfüllte Container können dazu

führen, dass auch eigentlich für die Container bestimmte EAG daneben abgestellt werden. Auch die Vermüllung der Standorte durch andere Abfallarten ist ein mögliches Problem. Dem Standort der Container kommt eine hohe Bedeutung zu, wie viele Betreiber angeben. Bei sehr öffentlichen Plätzen ist demnach die Vermüllung geringer als bei wenig frequentierten Standorten.

Aufgrund des großen Abfallspektrums und der Kontrolle durch die Mitarbeitenden haben Wertstoffhöfe nicht mit einer starken Vermüllung zu kämpfen. Probleme bereiten eventuell Abfälle, die außerhalb der Öffnungszeiten vor den Wertstoffhöfen abgestellt werden und dann von den Mitarbeitern entsorgt werden müssen.

Für beide Varianten der Händlersammlung und die Sammlung in öffentlichen Gebäuden spricht ebenfalls der Umstand, dass die Sammelbehälter unter einer gewissen Aufsicht stehen und die Überwindungsschwelle bei Verbrauchern erhöht, nichtpassende Geräte unsachgemäß zu entsorgen.

Bei EAG-Tonnen ist dann mit einer Vermüllung zu rechnen, wenn Verbraucher die Abholung dazu nutzen wollen, Großgeräte zu entsorgen und diese neben die Tonnen stellen. Zudem kann es passieren, dass andere Abfallarten dazugestellt werden.

Tabelle 60: Bewertung des Unterkriteriums Vermüllung des Standorts

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	mittel	6
EAG-Tonne	gering	7
Händlersammlung gesamt	sehr gering	8
Händlersammlung > 400m^2	sehr gering	8
Wertstoffmobil	keine	10
Wertstoffhof	keine - minimal	9
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	sehr gering	8

Generell kann einer Vermüllung durch gute Informationsmaßnahmen, welche Geräte das jeweilige Sammelsystem annimmt, vorgebeugt werden, damit Verbraucher direkt die passenden Systeme ansteuern.

4.5.3.2.5 Diebstahlrisiko

Ein besonderes Risiko stellt der Diebstahl von Geräten entlang der Sammelkette dar, wie er vor allem für hochwertige Geräte wie Laptops oder Mobiltelefone immer wieder berichtet wird. Dabei sind der Diebstahl aus dem Sammelbehältnis und der Diebstahl entlang der weiteren Entsorgungskette zu differenzieren. Beeinflussende Faktoren sind die Aufsichtsmöglichkeit und die Anzahl der Stationen nach der Übergabe auf dem Weg zu den Erstbehandlern.

Beim Wertstoffmobil wird kein Diebstahlrisiko gesehen, da die Geräte von den Verbrauchern direkt dem ständig anwesenden Personal übergeben werden, welches die Geräte dann entweder zu einer Sammelstelle oder sofort zu den Erstbehandlern bringt.

Die Sammlung in öffentlichen Gebäuden oder am Arbeitsplatz findet oftmals im Empfangsbereich statt, so dass die Behälter vom dortigen Personal beaufsichtigt werden können und Diebstahl so sehr unwahrscheinlich macht. Zudem sind die Gebäude nachts verschlossen.

Anfängliche Probleme mit Diebstählen aus Boxen im Handel wurden durch konstruktive Maßnahmen angegangen, während die Diebstahlsproblematik auf dem Transportweg der Boxen zu den Erstbehandlern durchaus besteht. Das Aufschneiden von Boxen oder das Verschwinden gesamter Pakete wurde berichtet[47].

Beim Wertstoffhof wird die Abgabe von Altgeräten teilweise von Personal beaufsichtigt und die Geräte entgegengenommen, teilweise legen Verbraucher die Geräte selbstständig in dafür bereitgestellte Container ab, was das Diebstahlrisiko erhöhen könnte. Es erfolgt jedoch immer eine Beaufsichtigung des Areals. In einigen Fällen wird von nächtlichen Beraubungsversuchen berichtet.

Bei Depotcontainern hängt das Diebstahlrisiko neben konstruktiven Merkmalen stark vom Containerstandort ab. Container an stark frequentierten Wegen, auf befriedeten Plätzen oder im Innenstadtbereich sind weniger anfällig für Beraubung als weniger einsehbare Standorte. Verschiedene ÖrE berichten von vereinzelten Beraubungsversuchen und aufgebrochenen Schlössern. Zu beachten ist, dass viele der bisher aufgestellten Container in wenig problematischen Gebieten aufgestellt wurden, in denen das Problem der Beraubung grundsätzlich geringer ist. Bei einer flächendeckenden Sammlung mit Depotcontainern könnte die Beraubungsquote daher ansteigen.

Am anfälligsten für Diebstahl erweist sich die EAG-Tonne. Da Haushaltstonnen in der Regel nicht zuverlässig gesichert sind, besteht ein erhöhtes Diebstahlrisiko (für Tonnen, die in abgeschlossenen Boxen oder Gebäudeteilen stehen nur jeweils bei der Bereitstellung am Straßenrand).

Tabelle 61: Bewertung des Unterkriteriums Diebstahlrisiko

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	gering	7
EAG-Tonne	hoch	3
Händlersammlung gesamt	sehr gering	8
Händlersammlung > 400 m^2	sehr gering	8
Wertstoffmobil	keines	10
Wertstoffhof	sehr gering	8
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	sehr gering	8

Abbildung 41 stellt eine Zusammenfassung der oben erläuterten Kriterien und eine Bewertung für die Sammelsysteme bei einer Gewichtung von 100 % auf die Oberkriterien „Akzeptanz“ und „Diebstahlrisiko“ dar.

[47] Vgl. Interview Holzmann

Abbildung 41: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Akzeptanz & Diebstahlrisiko bei Gewichtung 100%

Kriterien		Gewichtung (%)		Depotcon-tainer		EAG-Tonne		Händler-sammlung gesamt		Händler-sammlung > 400 m²		Wertstoff-mobil		Wertstoff-hof		Sammlung Arbeits-platz/ öff. Gebäude	
		Gf (%)	TGf (%)	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN
II Akzep-tanz	Erfassung versch. Altgerätearten	82,5	27,5	3	82,5	3	82,5	10	275	10	275	7	192,5	10	275	7	193
	Transparenz über Verbleib		20	8	160	8	160	8	160	8	160	8	160	8	160	8	160
	Datenschutz		25	5	125	5	125	5	125	5	125	5	125	5	125	5	125
	Vermüllung des Standorts		10	6	60	7	70	8	80	8	80	10	100	9	90	8	80
III Diebstahlrisiko		17,5	17,5	7	123	3	52,5	8	140	8	140	10	175	8	140	8	140
Zwischennutzwert II + III					550		490		780		780		752,5		790		698

Quelle: eigene Darstellung

4.5.3.3 Zustand der Geräte

Der Zustand der Geräte in den jeweiligen Sammelsystemen kann durch den Zerstörungsgrad sowie das Ausmaß von Fehlwürfen charakterisiert werden. Das Ausmaß der Qualitätsbeeinträchtigung ist relevant, da es die potenzielle Wiederverwendbarkeitsquote der Geräte beeinträchtigt, zudem können durch eine Zerstörung der Geräte ungewollte Emissionen entstehen. Eine hohe Fehlwurfquote verursacht einen erhöhten Sortieraufwand oder beeinträchtigt den Zustand der Geräte potenziell so stark, dass eine Wiederverwendung unmöglich gemacht oder die Aufbereitung erschwert wird.

4.5.3.3.1 Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung

Die Erfassung von EAG mit Sammelmobilen liefert was die Qualitätsbeeinträchtigung der Geräte angeht die besten Ergebnisse. Da die Geräte persönlich von den Verbrauchern an das Personal des Sammelmobiles übergeben werden, bleibt der Gerätezustand ab dem Übergabezeitpunkt erhalten (eine weitere Zerstörung beim Transport ist aufgrund sorgfältigen Einstapelns/ Einlegen in kleine Behältnisse nicht zu erwarten). In der persönlichen Kommunikation können sogar Informationen zum Gerätezustand erfragt werden, die eine gezielte Erfassung von EAG, die für eine Wiederverwendung geeignet sind, ermöglichen[48].

Im Gegensatz dazu sind beim Containersystem deutliche Unterschiede in der Erfassungsqualität zu verzeichnen. Stationen, bei denen potenziell die Qualität der EAG verschlechtert werden können, sind der Containereinwurf, das Entleeren des Containers in die Großmulde/ den Abrollcontainer des Transportfahrzeugs sowie das Abladen der Großmulde/ des Abrollcontainers.

Auch bei der EAG-Tonne ist eine mittlere Qualitätsbeeinträchtigung der Geräte zu erwarten, da die Geräte durch den Einwurf in die Tonne und beim Entleeren der Tonnen beschädigt werden können.

Die Konstruktion der Sammelboxen für die Abgabe im Handel zielt bewusst auf die Erhaltung des Gerätezustands ab und ist daher nur mit einer geringen Höhe (etwa 40 cm)

[48] Dies gilt übrigens ebenso, wenn die VerbraucherInnen ihre EAG an anderen betreuten Sammelstellen abgeben. Die stichprobenartige Umfrage zu Wertstoffhöfen ergab allerdings, dass eine solche Informationsabfrage oder -übergabe bei EAG aus privaten Haushalten nur sehr selten stattfindet.

ausgestaltet, weshalb mit einem geringen Qualitätsverlust zu rechnen ist. Das selbige gilt für die Boxen am Arbeitsplatz/in öffentlichen Gebäuden.

Beim Wertstoffhof werden die Geräte oftmals in offenen Containern gesammelt, die in der Realität gering geschützt gegen Witterungseinflüsse sind. Dadurch kann es zu Qualitätsbeeinträchtigungen kommen. Zudem ist in einigen Fällen nicht sichergestellt, dass die Geräte in die Container gelegt anstatt geworfen werden.

Tabelle 62: Bewertung des Unterkriteriums Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	eher mittel	5
EAG-Tonne	mittel	6
Händlersammlung gesamt	gering	7
Händlersammlung > 400 m^2	gering	7
Wertstoffmobil	keine	10
Wertstoffhof	eher mittel	5
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	gering	7

4.5.3.3.2 Fehlwurfquote

Unter Fehlwürfen werden in dieser Analyse Nicht-EAG wie Restmüllfraktionen und EAG, die aufgrund ihrer Eigenschaften separat gesammelt werden müssen, verstanden. Dazu zählen z. B. Bildschirme und andere quecksilberhaltige Geräte. Fehlwürfe führen zum Einen zu einem erhöhten Sortieraufwand und können zusätzlich zu einer Qualitätsbeeinträchtigung und somit einer verminderten Aufbereitungsquote der Geräte sowie Emissionen führen. Wie bei vielen anderen Kriterien auch spielt der Faktor, ob die Abgabe in irgendeiner Form beaufsichtigt werden kann, eine große Rolle. Bei Systemen, wo dies der Fall ist, ist die Fehlwurfquote geringer als bei anderen Systemen.

Die Sammlung mit Wertstoffmobilen erzielt auch bei diesem Kriterium die besten Ergebnisse, denn wegen der Personalpräsenz spielen Fehlwürfe so gut wie keine Rolle.

Ähnliches gilt für die Wertstoffhöfe, da das Personal die Besuchern direkt anweisen kann, welche Abfälle in welche Behälter gehören. Zudem sind Wertstoffhöfe weniger anfällig für eine vorsätzliche Fehlbefüllung mit anderen Abfallarten als Behälter im öffentlichen Raum, da eine Abfallentsorgung „im Vorbeigehen“ unwahrscheinlich ist.

Diverse Betreiber von Depotcontainern geben die bislang festgestellte Fehlwurfquote mit < 1 % bis 5 % an. So wurden bei den Versuchen im Kreis Soest mit 60 Depotcontainern (Sammlung kleine EAG und Metall) Fehlwürfe deutlich unter 1 % festgestellt (Noll 2013), in Wuppertal lagen diese zwischen 2 - 4 % (Steinbrink 2012). Auch andere Kommunen geben an, dass bislang kein nennenswerter Fehlwurf festgestellt werden konnte (persönliche Kommunikation 2014). Wie bei dem Thema Diebstahlrisiko ist hier jedoch festzuhalten, dass viele der Depotcontainer bevorzugt in Stadtbereichen aufgestellt wurden, in denen wenige Probleme mit Fehlwürfen zu erwarten waren. Bei einer Ausweitung der Sammlung mit Depotcontainern wird diese Quote daher vermutlich steigen. Die

Gestaltung der Einwurfklappen ist ein wesentlicher Faktor für den Grad von Diebstahl und Fehlwürfen.

Die EAG-Tonne ist für Fehlwürfe durch Restmüll sehr anfällig. Die Konstruktionsweise der Öffnung verhindert nur den Einwurf von sehr großen Gegenständen. Zudem dauert es im Vergleich zu beispielsweise Restmülltonnen sehr lange, bis eine EAG-Tonne voll ist und geleert wird. Eventuell auftretender Platzmangel in anderen Abfalltonnen könnte so dazu verleiten, auch andere Abfallsorten in die Tonne zu geben. Eine weitere Möglichkeit für die Zugabe von Fehlwürfen besteht während der Bereitstellung zur Abholung, da auch Passanten die Tonnen mit Fehlwurf befüllen könnten.

Eine Quelle besagt, dass die Fehlwurfrate für die Händlersammlung ca. 8 – 9 % beträgt, wobei zu beachten ist, dass ihr zufolge bereits Funkgeräte als Fehlwurf gelten und aussortiert werden.[49] Letztlich ist dies nicht unbedingt negativ zu bewerten, da auch diese Geräte erfasst werden müssen. Positiv zu bewerten ist der Umstand, dass die Sammelbehälter meist im Kassenbereich der Geschäfte stehen und die Anwesenheit des Personals abschreckend wirkt. Zudem kann das Personal gefragt werden, ob das zu entsorgende Gerät in diesem Behälter korrekt entsorgt ist.

Ähnliches gilt für die Sammlung am Arbeitsplatz oder in öffentlichen Gebäuden, da die Behälter dort meist im Empfangsbereich stehen und somit die Überwindung aufgrund des anwesenden Personals erhöht wird. Auszuschließen sind Fehlwürfe jedoch nicht, da es nicht zu den Aufgaben des Personals gehört, die Behälter zu bewachen und diese auch nicht unbedingt die Expertise aufweisen (müssen), die Verbraucher bezüglich der korrekten Entsorgung ihrer EAG zu beraten.

Tabelle 63: Bewertung des Unterkriteriums Fehlwurfquote

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	mittel	6
EAG-Tonne	eher hoch	4
Händlersammlung gesamt	Sehr gering	8
Händlersammlung > 400 m^2	Sehr gering	8
Wertstoffmobil	keine	10
Wertstoffhof	keine - minimal	9
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	gering	7

Abbildung 42 stellt eine Zusammenfassung der oben erläuterten Kriterien und eine Bewertung für die Sammelsysteme bei einer Gewichtung von 100 % auf das Oberkriterium Zustand dar.

[49] Vgl. Interview Holzmann.

Abbildung 42: Ergebnisse der NwA für das Oberkriterium Zustand bei Gewichtung 100 %

Kriterien		Gewichtung (%)		Depotcon-tainer		EAG-Tonne		Händler-sammlung gesamt		Händler-sammlung > 400 m²		Wertstoff-mobil		Wertstoff-hof		Sammlung Arbeits-platz/ öff. Gebäude	
		Gf (%)	TGf (%)	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN
IV Zu-stand	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	100	50	5	250	6	300	7	350	7	350	10	500	5	250	7	350
	Fehlwurfquote		50	6	300	4	200	8	400	8	400	10	500	9	450	7	350
Zwischennutzwert IV					550		500		750		750		1000		700		700

Quelle: eigene Darstellung

4.5.3.4 Wirtschaftlichkeit und Aufwand

Basierend auf den zuvor geschilderten Unterschieden variieren auch die Kostenstrukturen und der Aufwand für Systemetablierung der Sammelsysteme und haben unterschiedliche Schwerpunkte.

4.5.3.4.1 Systemetablierung

Zur Systemetablierung zählen die Kriterien „Kosten für die Anschaffung“, „Flächenverfügbarkeit“ und „rechtlicher Aufwand“

4.5.3.4.2 Kosten für die Anschaffung

Da nicht für alle Sammelsysteme Kostenangaben vorliegen, können diese teilweise nur geschätzt werden. Als Anschaffungskosten verstanden werden hier nur die Kosten für die Sammelbehälter bzw. auch für die Flächen, teilweise fallen auch Kosten für Informations- oder Hinweisschilder an.

Bei einer Neuanschaffung würden Wertstoffhöfe und Sammelmobile bei weitem die höchsten Kosten veranschlagen. Im Falle des Wertstoffhofs sind Sammelbehälter, Gebäude und Umzäunung des Geländes nur einige der Faktoren, die hohe Summen veranschlagen, wenn zur Erhöhung der Sammelergebnisse Wertstoffhöfe neu eingerichtet werden sollen. Zu erwähnen ist jedoch, dass ein dichteres Netz an Wertstoffhöfen nicht nur der Sammlung von EAG zugute käme, sondern auch anderen Abfallfraktionen, was die Kosten teilweise relativiert.

Sammelmobile sind in ihrer Anschaffung ebenfalls sehr kostspielig, wenn die Sammelziele durch eine Erhöhung solcher Sammelstellen erreicht werden sollen. Auch hier muss jedoch erwähnt werden, dass neben Wertstoffen auch Problemstoffe wie Chemikalien, Öle oder Farben erfasst und zu einer Kostenrelation führen würde.

Bei den Sammelboxen für die Sammlung von Elektrokleingeräten und Leuchtstoffröhren im Handel und in öffentlichen Gebäuden bzw. am Arbeitsplatz handelt es sich um einfache Pappboxen, die in ihrer Anschaffung sehr günstig sind, sogar wenn sie bei jeder Abholung ausgewechselt und nicht wiederverwendet werden sollten. Für größere Geräte, die im Handel abgegeben werden und für die Zusammenführung kleiner Mengen von Kleingeräten müssen zudem Gitterboxen bereitgestellt werden, die jedoch auch nicht sehr kostenintensiv sind.

Die Kostenspanne für handelsübliche Abfalltonnen mit einer Größe von 40-240l liegen zwischen 16 € und 24 € in Anschaffung und Verteilung. Eine MGB 120 kostet laut Cord-

Landwehr & Kranert (2010) in der Anschaffung und Verteilung an die Haushalte 22,20 €. Auf einen Abschreibungszeitraum von zehn Jahren gesehen und inklusive Reparatur-,Verwaltungs- und anderer Kosten kommt man auf einen Kostenbetrag von 4,20 € pro Tonne (ebd.). Da pro Tonne jedoch vergleichsweise wenig Menschen angeschlossen sind, muss eine hohe Stückzahl angeschafft werden, was die Kosten in die Höhe treibt. Die Tonnen sind dafür jedoch für eine lange Benutzungsdauer ausgelegt.

Die relativ große Anzahl von Versuchen mit Depotcontainern und die relative Vergleichbarkeit der Kostenstrukturen bei Behältern und Sammlung mit denen der Altglassammlung lassen für die Depotcontainer etwas besser abgesicherte Erwartungswerte zu. Die Behälterkosten liegen dabei in der Größenordnung von 900 € bis 1.700 € je Stück und es wurde in Pilotversuchen von einer Abschreibung über fünf Jahre ausgegangen (Quelle: persönliche Kommunikation 2014). Zu beachten ist, dass es sich dabei oft um Prototypen handelt und somit möglicherweise Optimierungs- und Einsparungspotenzial besteht.

Tabelle 64: Bewertung des Unterkriteriums Kosten für Anschaffung

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	eher mittel	5
EAG-Tonne	gering	6
Händlersammlung gesamt	gering	7
Händlersammlung > 400 m^2	gering	7
Wertstoffmobil	Sehr hoch	2
Wertstoffhof	Gerade noch nicht unverhältnismäßig	1
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	sehr gering	8

4.5.3.4.3 Flächenverfügbarkeit

Die Flächenverfügbarkeit wird bei allen Sammelsystemen mit gut oder sogar überragend bewertet. Das Wertstoffmobil schneidet dabei mit der vollen Punktzahl am besten ab, da es für temporär begrenzte Zeiten meist an öffentlichen Plätzen stehen kann.

Sammelboxen in öffentlichen Gebäuden und am Arbeitsplatz bedürfen ebenfalls nicht viel Fläche und finden zumeist im Eingangsbereich der Gebäude einen Platz zum Aufstellen.

Die Flächenverfügbarkeit für EAG-Tonnen hängt teilweise von der Bebauungsstruktur im Anwendungsgebiet ab. So ist es in sehr urban geprägten Stadtteilen unter Umständen schwierig, große Mülltonnen auf dem Bürgersteig zur Abholung bereitzustellen, da der Platz z. B. durch Stell-/ Parkplätze, Geh- und Aufstellflächen belegt ist, aber auch die Möglichkeiten zur Müllentsorgung in den Häusern selber fehlen. So kommt es in einigen

Stadtteilen Hamburgs dazu, dass Restmüllsäcke anstelle von Mülltonnen benutzt werden (Hamburger Wochenblatt 2013). Da dieses Problem jedoch Bebauungsstrukturabhängig ist, wird die allgemeine Flächenverfügbarkeit für EAG-Tonnen als sehr gut angesehen.

Für Depotcontainer steht grundsätzlich ein sehr flächendeckendes Netz von bereits existierenden Standorten für die Altglas- und Altpapiersammlung zur Verfügung, so dass die Standortsuche laut Aussage diverser Betreiber nicht sehr aufwendig ist. So sind in Deutschland derzeit ca. 300.000 Altglascontainer aufgestellt (BV Glas 2014). Die potenzielle Flächenverfügbarkeit könnte durch bestimmte Präferenzen eingeschränkt werden, wie beispielsweise einer guten Einsehbarkeit, um Diebstähle und Vandalismus zu vermeiden oder einer starken Frequentierung, um höchstmögliche Sammelmengen zu erzielen. Der Standplatzcharakter ist dabei eine bestimmende Determinante. So geben Gallenkemper & Middendorf (2013) an: „Die größten Mengen werden im Allgemeinen an Standplätzen in der Nähe von Einkaufszentren (Standplatzcharakter 1) erfasst. Das verfüllte Containervolumen je Container und Monat für diesen Standplatzcharakter liegt teilweise um bis zu 100 % über den Durchschnittswerten der übrigen Standplatzcharaktere. Dies ist im Wesentlichen […] auf die Attraktivität des jeweiligen Standplatzes zurückzuführen“. Eine ähnliche Bewertung erfolgt im Rahmen der Versuche mit Depotcontainern in Soest, wo vor Supermärkten die größten Mengen gesammelt wurden (Noll 2013). Erschwerend hinzu kommen könnte eventuell auftretender Platzmangel an den bereits existierenden Containerstandorten, insbesondere in Innenstadtbereichen oder Fußgängerzonen. Zudem müssen die Standorte bestimmte Kriterien wie einen Mindestabstand zur Wohnbebauung, zur Fahrbahn und zum Bürgersteig, und Platz für den Leerungsprozess einhalten, oder eventuelle bauliche Anpassungen (Pflasterung des Untergrunds) vorgenommen werden. Insgesamt wird die Flächenverfügbarkeit, auch von den handelnden Akteuren, aber als gut bis sehr gut wahrgenommen.

Die Flächenverfügbarkeit zur Neuerrichtung von Wertstoffhöfen wird als ungenügend eingestuft. Von allen Sammelsystemen benötigen Wertstoffhöfe am meisten Platz. Eine Erhöhung der Sammelstellen, zumal in Stadtlage und nicht in Gewerbegebieten, so dass sie für mehr Menschen mit weniger Aufwand erreichbar sind, ist mit Wertstoffhöfen in dieser Größenordnung nicht möglich.

Die Flächenverfügbarkeit für die Sammlung bei Händlern ist schwer abzuschätzen, da es sehr individuell auf die Gestaltung und Größe der Geschäftsräume ankommt. Fläche wird dabei für die Aufstellung von Sammelbehältern im Lagerraum und/oder für die Aufstellung von Boxen im Verkaufsraum benötigt, in die die Verbraucher eigenständig die Geräte einwerfen können. Die Maße der roten Sammelbox von Take-e-way, die als eine solche Box eingesetzt wird, belaufen sich dabei auf 60x30x80cm (Breite, Tiefe, Höhe) (Take-e-way o.J.). Die Frage der Flächenverfügbarkeit ist vermutlich nur mit Hinblick auf die Geschäftsgröße wirklich zu beantworten. So geben in einer Umfrage des HDE unter 580 Einzelhändlern aus verschiedenen Branchen 65 % der Einzelgeschäfte mit weniger als 400 m² Verkaufsfläche und 40 % der Einzelgeschäfte mit mehr als 400 m² Verkaufsfläche an, dass sie keinen Platz für die Aufstellung von Sammelbehälter hätten (HDE 2014). Die Flächenverfügbarkeit bei der Variante „Händlersammlung > 400 m²“ wird aufgrund der größeren Räumlichkeiten und Lagermöglichkeiten der Geschäfte daher etwas besser eingeschätzt als bei der Variante „Händlersammlung gesamt“. Im Fall der Kleinsammelbox in Hamburg wurde die Verfügbarkeit von Flächen als

prinzipiell nicht schlecht angesehen und es hat sich gezeigt, dass das Konzept vielfach anerkennend bewertet und für den Fall einer allgemeinen Rücknahmepflicht begrüßt wurde, gleichzeitig aber die hohen Mietpreise bzw. die Umsatzrendite pro Quadratmeter in den Innenstadtlagen als häufigstes Gegenargument der Einzelhandelsgeschäfte genannt wurde, was die Flächenverfügbarkeit für eine Händlersammlung einschränke (Take-e-way 2012).

Tabelle 65: Bewertung des Unterkriteriums Flächenverfügbarkeit

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	gut - sehr gut	7
EAG-Tonne	sehr gut	8
Händlersammlung gesamt	gut	6
Händlersammlung > 400 m^2	gut – sehr gut	7
Wertstoffmobil	überragend	10
Wertstoffhof	ungenügend	0
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	sehr gut - überragend	9

4.5.3.4.4 Rechtlicher Aufwand

Beim Kriterium „rechtlicher Aufwand“ zeigen sich – mit Ausnahme des Wertstoffhofs - keine großen Differenzen zwischen den Sammelsystemen. Bei allen Systemen wird davon ausgegangen bzw. kann mit einiger Sicherheit gesagt werden, dass der Aufwand für Genehmigungen, Absprachen mit Behörden und Antragstellungen gering bis minimal ist. Die Ausnahme bildet hier der Wertstoffhof, da mit einer Neuerrichtung diverse Genehmigungen erforderlich sind.

Für die Sammlung mit Depotcontainern muss unterschieden werden, ob bereits vorhandene Containerstandorte ohne großen Aufwand erweitert werden können, oder ob Aufwand für diese Erweiterung betrieben werden muss. In der Regel muss eine Genehmigung durch die Flächeneigentümer bzw. eine Nutzungsvereinbarung mit diesen vorliegen. Werden bereits vorhandene Containerstandorte benutzt, liegen diese Genehmigungen meist schon vor oder können um die EAG-Fraktion erweitert werden, weshalb der Aufwand als sehr gering einzuschätzen ist (Quelle: persönliche Kommunikation mit Betreibern). Müssen die Standorte aufgrund von Platzmangel erweitert werden (z. B. bauliche Veränderungen vorgenommen werden) erhöht sich der Aufwand. Das betrifft vor Allem die Abstimmung mit den zuständigen Behörden bei der Aufstellung im öffentlichen Raum (dort vor allem in dicht besiedelten Gebieten bzw. Fußgängerzonen u. ä.). Der Aufwand hängt zudem davon ab, wie viele verschiedene Parteien an der Abstimmung beteiligt sind und den vorgesehenen Standorten zustimmen müssen. Dies kann den Abstimmungsprozess deutlich in die Länge ziehen und erschweren.

Für die EAG-Tonne ist der rechtliche Aufwand vergleichsweise sehr gering, da keine zusätzlichen Genehmigungen notwendig sind und eine Abstimmung mit den Eigentümern erfolgen muss.

Für beide Varianten der Händlersammlung und die Sammlung am Arbeitsplatz/in öffentlichen Gebäuden ist der rechtliche Aufwand minimal.

Tabelle 66: Bewertung des Unterkriteriums Rechtlicher Aufwand

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	gering	7
EAG-Tonne	sehr gering	8
Händlersammlung gesamt	keiner - minimal	9
Händlersammlung > 400 m^2	keiner - minimal	9
Wertstoffmobil	keiner - minimal	9
Wertstoffhof	eher mittel	5
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	keiner - minimal	9

4.5.3.4.5 Erfassungsaufwand

Der Aufwand für die Erfassung der EAG im laufenden Betrieb wird bestimmt durch die Kosten für das Personal, welches für die Sammlung benötigt wird, die Flächenkosten des Sammelsystems und die Aufwendungen für die Sortierung. Da sich die Kosten je nach Struktur des Sammelgebiets stark unterscheiden können, ist eine genaue Angabe der Kosten nicht möglich. Vor diesem Hintergrund und da nur wenige Angaben zu den Kosten der Sammelsysteme für EAG aus Pilotversuchen vorliegen, erfolgen die derzeit möglichen Kostenbetrachtungen teilweise teilquantitativ bzw. als Schätzungen.

Als zusätzliche Kosten müssen die Betriebskosten für das Sammelfahrzeug und die Transportkosten der EAG betrachtet werden. Der Transportaufwand setzt sich laut Gallenkemper & Middendorf (2013) aus folgenden Fahrten zusammen:

- Fahrt vom Betriebshof ins Sammelgebiet,
- Fahrt vom Sammelgebiet zur Aufbereitungsanlage,
- Fahrt von der Aufbereitungsanlage zum Betriebshof.

Zu beachten ist die Unterscheidung zwischen Transport und Sammlung. Der Transport hört ab dem Zeitpunkt auf, wo der erste EAG-Behälter geleert wird und beginnt wieder mit dem Beenden der Leerung des letzten Behälters. Der Weg, der dazwischen zurückgelegt wird, fällt in den Bereich Sammlung und wird im weiteren Verlauf näher betrachtet.

Eine Bewertung des Transportaufwandes für die einzelnen Systeme ist im Rahmen der vorliegenden Analyse kaum möglich, da sie noch mehr als bei anderen Kriterien von den örtlichen Strukturen abhängt: Werden die gesammelten EAG direkt zu den Erstbehandlern transportiert oder zunächst zwischengesammelt? Wie weit entfernt sind die Erstbehandler oder der Wertstoffhof? Wie groß ist das Sammelgebiet und müssen mehrere Fahrten unternommen werden, um die EAG einzusammeln? Welche Fahrzeuge werden für den Transport benutzt und was sind deren Betriebskosten? Im Rahmen dieser Nutzwertanalyse ist der Transportaufwand daher kein Differenzierungskriterium.

4.5.3.4.6 Personal

Die Personalkosten für die Sammlung von EAG hängen stark vom zeitlichen Aufwand für die Sammlung ab. Um Rückschlüsse darauf zu erlangen, kann dieser für die Sammlung einer Tonne EAG geschätzt werden und zudem auch Rückschlüsse auf weitere Kosten getroffen werden, wie beispielsweise die Betriebskosten für die Sammelfahrzeuge. Anzumerken ist, dass der tatsächliche Aufwand abhängig von den örtlichen Strukturen und Besonderheiten ist und die hier angegebenen Werte daher nur Annäherungen darstellen.

Für die Sammlung mit EAG-Tonnen lassen sich als grobe Annäherung Erfahrungswerte aus der Sammlung von Restabfall zum Vergleich heranziehen. Ein MGB 120 l fasst laut den Angaben der INFA GmbH zum Raumgewicht für die Sammelgruppen 3 und 5 bei Vollbefüllung ca. 17 kg EAG (142 kg/m^3) (INFA (o.J., zitiert in Statistisches Landesamt Baden-Württemberg o. J.). Geht man bei der Sammlung von einem mittleren Füllgrad von 80 % aus, so befindet sich in jedem MGB ca. 13,6 kg EAG. Für das Sammeln einer Tonne müssen demnach ca. 74 Behälter geleert werden. In einer Mischung aus geschlossener und offener Mehrfamilienhausbebauung mit mittlerer Verkehrsbehinderung[50] besteht eine Behälterdichte von ca. 10-15 Behälter/100 m (Kranert & Cord-Landwehr 2010), womit ca. 500-800 m für die Sammlung einer Tonne EAG zurückgelegt werden müssen. Kranert & Cord-Landwehr (2010) geben die mittlere Sammelzeit je Behälter für eine solche Gebietsstruktur mit ca. 20 Sekunden an, womit die Sammlung einer Tonne EAG mittels EAG-Tonnen ca. 25 Minuten Arbeitszeit für eine Person in Anspruch nehmen würde.

Zusätzlich lässt sich die Dauer darüber abschätzen, wie lange es dauert bis eine EAG-Tonne voll ist (=80 % gefüllt). Zu beachten ist, dass diese Berechnungen auf der Annahme basieren, dass kleine EAG der Sammelgruppen 3 & 5 nur über das betrachtete System entsorgt und bei keiner anderen Sammelstelle abgegeben werden. Geht man von unten stehender Definition aus, gibt es pro Haus mind. sechs Wohneinheiten. Laut Bundesdurchschnitt leben in Deutschland pro Haushalt ca. zwei Personen (BiB 2014), somit ergibt sich eine Anzahl von 12 Personen pro angeschlossener EAG-Tonne. Im Jahr 2010 wurden - abzüglich der Bildschirme in Sammelgruppe 3 – ca. 732.180 Tonnen Elektrokleingeräte der Sammelgruppen 3 & 5 auf den Markt gebracht. Analog dazu lässt sich schlussfolgern, dass im Jahr 2013[51] in Deutschland EAG dieser beiden Sammelgruppen von 8,95 kg/E*a erzeugt wurden. Hochgerechnet auf 12 Personen ergibt dies 107,4 kg/Jahr. Nimmt man optimistisch eine Sammelquote von 80 % an, gibt es ein Sammelpotenzial von 85,9 kg/Jahr. Umgerechnet auf das Fassungsvermögen der EAG-Tonne von 13,6 kg muss eine EAG-Tonne demnach 6,3 Mal im Jahr geleert werden. Dies erfordert eine Leerung ca. alle 8 Wochen.

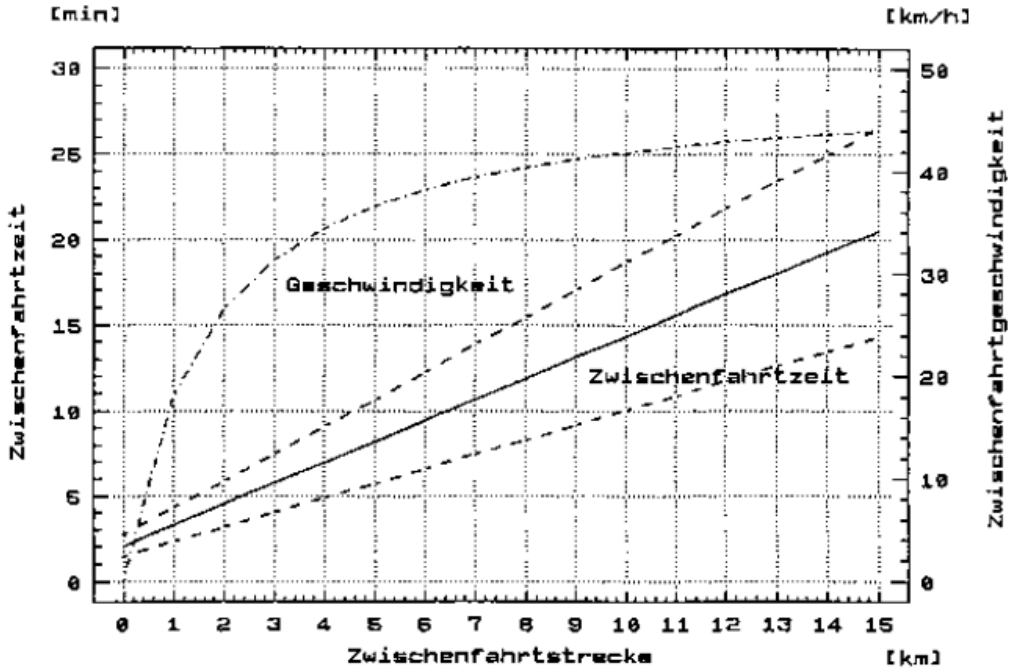
[50] Fuhrmann (2007) definiert geschlossene Mehrfamilienhausbebauung als “geschlossene innerstädtische Bebauung mit mind. drei Vollgeschossen oder mind. sechs Wohneinheiten je Hauseingang, Behinderung durch Verkehr und enge Bebauung.“ Offene Mehrfamilienhausbebauung wird definiert als „offene städtische Bebauung mit einzeln stehenden Mehrfamilienhäusern, sowie geschlossene innerstädtische Mehrfamilienhausbebauung, die nicht der [geschlossenen Mehrfamilienhausbebauung] entspricht.“

[51] Abfallanfall nach 3 Jahren Nutzungsdauer.

Bei der Sammlung mit Depotcontainern kann man von einer mittleren Sammelzeit von 3-5 Minuten pro Container ausgehen (Gallenkemper & Doedens 1988). In einen handelsüblichen Container von 4 m3 passen bei Vollbefüllung ca. 570 kg EAG. Unter der Annahme, dass die Depotcontainer ca. 2 km voneinander entfernt stehen, ergibt sich eine Bereitstellungsdichte von ca. 0,28 t/km. Da heutige Container per Sensoren den Füllgrad übermitteln können, wird hier davon ausgegangen, dass ein Container nur bei fast vollständiger Befüllung geleert wird, die mit ca. 90 % definiert wird und was ein Gewicht von gut 500 kg ergibt. Um eine Tonne EAG zu sammeln müssen demnach zwei Depotcontainer geleert werden, was eine reine Sammelzeit von 6-10 Minuten veranschlagt. Je nach Entfernung der einzelnen Depotcontainer untereinander muss nun noch die Fahrtzeit zwischen den Containern eingerechnet werden. Anhand der obigen Annahmen wird davon ausgegangen, dass der nächste Container ca. 2 km entfernt liegt, was einer ungefähren Fahrtzeit von 5 Minuten entspricht (siehe Abbildung 43). Die Sammlung einer Tonne EAG nimmt daher ca. 11-15 Minuten in Anspruch.

Am Beispiel des Bezirks Hamburg-Mitte lässt sich die ungefähre Dauer der Befüllung eines Depotcontainers abschätzen. Der Bezirk erfüllt die formulierten Gebietsstrukturen von sechs Haushalten pro Wohnhaus (Statistisches Amt Hamburg 2014). Unter der Annahme, dass die Depotcontainer 2 km entfernt voneinander stehen, ergibt sich ein Einzugsgebiet von 4 km² pro Container. Die Bevölkerungsdichte für den Bezirk Hamburg-Mitte liegt bei 2.138 Personen/km², womit sich für das Einzugsgebiet eine Bevölkerungsdichte von 8.552 Personen ergibt. Mit dem am Beispiel der EAG-Tonne errechneten Wert von 8,95 kg/Einwohner pro Jahr ergibt sich eine Gesamtmenge von 76.540 kg pro Jahr. Auf das Fassungsvermögen der Depotcontainer von 500 kg gerechnet bedeutet dies, dass ein Container ca. 153 Mal im Jahr geleert werden muss, somit knapp drei Mal die Woche.

Abbildung 43: Zusammenhang zwischen der Zwischenfahrtzeit, Zwischenfahrtstrecke und Zwischenfahrtgeschwindigkeit eines Mülltransporters



Quelle: Gallenkemper & Middendorf (2013)

Ähnliche Berechnungen lassen sich für die Sammlung in öffentlichen Gebäuden/am Arbeitsplatz und für die Varianten der Händlersammlung anstellen. Nimmt man die Sammelbox von Take-e-way[52] als Beispiel für die Sammlung in öffentlichen Gebäuden, so lassen sich damit ca. 6,8 kg EAG der Sammelgruppen 3 und 5, und ca. 6,5 kg Gasentladungslampen[53] sammeln. Um eine Gesamtmenge von einer Tonne der SG 3 und 5 zu sammeln, müssten demnach – bei einem Füllgrad von 80 % und einem Gesamtgewicht von 5,5 kg – 182 Sammelboxen gesammelt werden (bei Vollbefüllung 147). Bei einer angenommen Entfernung von 4 km zwischen den Sammelstellen in öffentlichen Gebäuden und einer Fahrtzeit von ca. 7 Minuten für diese Strecke, würde alleine das Einsammeln einer solchen Menge von Behältern ca. 21 Stunden in Anspruch nehmen. Hinzu kommt das Holen und Einladen der Behälter, was aufgrund der längeren Wege in öffentlichen Gebäuden bzw. am Arbeitsplatz geschätzt 5 Minuten pro Behälter in Anspruch nehmen wird und zusätzliche 910 Minuten erfordert. Somit kommt man auf einen Zeitaufwand von ca. 36 Stunden pro gesammelter Tonne. Bei der Sammlung in Geschäften bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ reduziert sich der Aufwand entsprechend, da die Dichte der Sammelstellen höher ist und die Entfernung mit 2 km geschätzt und, wie in der obigen Rechnung mit einer Fahrzeit von 5 Minuten veranschlagt wird. Somit kommt man auf einen Zeitaufwand von 15 Stunden für die Fahrzeit. Da die Annahme getroffen wird, dass die Wege in den Geschäften kürzer sind, werden für jeden der 182 Behälter 3 Minuten für die Sammlung veranschlagt. Dies summiert sich auf eine Sammelzeit von insgesamt ca. 24 Stunden. Bei der Variante „Händlersammlung > 400 m^2“ erhöht sich die Sammelzeit entsprechend, da insgesamt weniger Sammelstellen zur Verfügung stehen und diese in weiterer Entfernung zueinander liegen. Beim Kriterium „Lage/zurückzulegender Weg“ wurde dabei eine Strecke von 7 km angenommen, was einer Fahrtzeit von ca. 11 Minuten zwischen den Geschäften entspricht. Dies summiert sich auf eine Fahrtzeit von 33 Stunden und ergibt mit zusammen mit dem Zeitaufwand zur Sammlung der Behälter einen Gesamtaufwand von ca. 42 Stunden.

Zu beachten ist, dass die Take-e-way-Boxen auch Gasentladungslampen sammeln. Bezieht man diese auch in die Rechnung mit ein und berechnet die Gesamtsammelzeit für eine Tonne EAG mit einer Mischung aus SG 3,4 & 5, so kommt man mit den oben genannten Parametern bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ auf eine Sammelzeit von ca. 12,5 Stunden, und bei der Sammlung in öffentlichen Gebäuden/am Arbeitsplatz auf ca. 19 Stunden. Bei der Variante „Händlersammlung > 400m^2“ erhöht sich dieser Aufwand aufgrund der längeren Fahrtzeit zwischen den Sammelstellen auf ca. 22 Stunden.

Diese Berechnungen stellen für die Händlersammlung jedoch eher das worst-case-Szenario dar, wenn man davon ausgeht, dass jede Sammelbox einzeln abgeholt wird. Realistischer ist jedoch, dass die vollen Sammelboxen vom Personal regelmäßig geleert werden und die EAG in Gitterboxen gesammelt werden, bis diese voll sind. So fasst eine Gitterbox mit 1,5 m3 ca. 200 kg EAG bei 90 % Füllgrad. Bereits mit fünf solcher Gitterboxen

[52] Die inneren Maße jeweils einer Kammer der Sammelbox belaufen sich auf 0,283m*0,61m*0,28m=0,048m3; die Sammelbox besteht aus einer Kammer für kleine EAG und einer Kammer für Gasentladungslampen

[53] Das Raumgewicht für Gasentladungslampen wird mit ca. 135,3kg/m3 angegeben (Infa (o.J.) zitiert in Statistisches Landesamt Baden-Württemberg o.J.).

könnte daher eine Tonne EAG gesammelt werden. Geht man davon aus, dass pro Geschäft eine Gitterbox abzuholen ist, müssen fünf Geschäfte und bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ eine Gesamtdistanz von 8 km abgefahren werden, was einer Fahrtzeit von 20 Minuten zuzüglich einer Einladezeit von 5 Minuten pro Gitterbox entspricht und somit einen Gesamtzeitaufwand von ca. 45 Minuten bedeutet. Bei der Variante „Händlersammlung > 400 m²“ müssen 28 km zurückgelegt werden, was einer Fahrtzeit von 44 Minuten entspricht und zusammen mit der Einladezeit einen Gesamtzeitaufwand von ca. 70 Minuten ergibt. Diese Annahmen wurden der vorliegenden Bewertung zugrunde gelegt. Vorteilhaft für diese Art der Sammlung ist, dass keine Spezialfahrzeuge benötigt werden, sondern die Boxen auch mit normalen Transportern bewegt werden können. Zudem wäre es möglich, die Abhollogistik mit der sowieso bestehenden Logistik der Geschäfte zu verbinden und so den Zeitaufwand zu reduzieren.

Eine Berechnung der Füllzeiten mit den oben definierten Annahmen bezüglich Bevölkerungsdichte und Abfallaufkommen zeigt, dass bei der Händlersammlung mit Gitterboxen 383 Leerungen pro Jahr stattfinden müssten, wenn man die gesamten pro Jahr im Einzugsgebiet anfallenden Mengen EAG der SG 3 & 5 sammeln will– mehr als eine Leerung pro Tag. Bei der Sammlung mit Sammelboxen erhöht sich die Anzahl der Leerungen aufgrund der geringen Kapazität der Box um ein Vielfaches.

Der Zeitaufwand für das Sammeln einer Tonne EAG beim Wertstoffhof und mit dem Sammelmobil lässt sich wesentlich schlechter abschätzen. Ein Betreiber eines Wertstoffmobils gibt an, dass pro Sammeltermin, der einmal im Monat stattfindet und fünf Stunden dauert, ca. 500 kg EAG gesammelt werden. Somit käme man auf einen Zeitaufwand von 10 Stunden pro Tonne EAG zuzüglich der Fahrten zwischen den verschiedenen Standorten (Quelle: persönliche Kommunikation mit Betreiber). Diese Zahlen hängen aber stark von der Gebietsstruktur und den parallel angebotenen Sammelsystemen ab.

Da es sich beim Wertstoffhof um ein reines Bringsystem handelt, fällt der Aufwand nicht für die Systembetreiber an.

Tabelle 67: Sammelzeit und Behälteranzahl pro Tonne je Sammelsystem

Sammelsystem	Fassungsvermögen EAG (80 %)	Behälter pro gesammelter Tonne	Zeitaufwand pro gesammelter Tonne
EAG-Tonne (MGB 120)	13,6kg	74	Ca. 25 Minuten
Depotcontainer	500 kg (90 %)	2	Ca. 11-15 Minuten
Händlersammlung gesamt (mit Gitterboxen)	Ca. 200 kg (90 %)	5	Ca. 45 Minuten
Händlersammlung > 400 m² (mit Gitterboxen)	Ca. 200 kg (90 %)	5	Ca. 70 Minuten
Händlersammlung gesamt (mit Sammelbox, nur SG 3 & 5)	5,5kg	182	Ca. 24 Stunden

Sammelsystem	Fassungsvermögen EAG (80 %)	Behälter pro gesammelter Tonne	Zeitaufwand pro gesammelter Tonne
Händlersammlung > 400 m² (mit Sammelbox, nur SG 3 & 5)	5,5kg	182	Ca. 42 Stunden
Händlersammlung gesamt (mit Sammelbox, SG 3,4 & 5 zusammen)	10,6kg	94	Ca. 12,5 Stunden
Händlersammlung > 400 m² (mit Sammelbox, SG 3,4 & 5 zusammen)	10,6kg	94	Ca. 22 Stunden
Öffentliche Gebäude/ Arbeitsplatz (nur SG 3 & 5)	5,5kg	182	Ca. 36 Stunden
Öffentliche Gebäude/ Arbeitsplatz (SG 3,4 & 5 zusammen)	10,6kg	94	Ca. 19 Stunden
Wertstoffmobil	N. N.	N. N.	N. N.
Wertstoffhof	N. N.	N. N.	N. N.

Nimmt man nun noch eine Schätzung des Personalaufwands pro Sammelsystem für die Sammlung einer Tonne EAG vor, so lassen sich die ungefähren Kostenstrukturen der Sammelsysteme in puncto Personal absehen. Neben den Lohnkosten haben weitere Posten Einfluss auf die Personalkosten, wie tarifliche bzw. betriebliche Vereinbarungen, notwendige Personalreserven und Anteile für Wagnis und Gewinn, die hier nicht näher betrachtet werden können (Kranert & Cord-Landwehr 2010).

Am personalintensivsten erweist sich das Wertstoffmobil mit einem Personaleinsatz von 2 – 3 geschulten Mitarbeitern je Sammeltermin. Da die Sammelleistung, weil es sich vom Charakter eher um ein Bringsystem handelt, nicht direkt abhängig von der Personalanzahl ist, reduziert sich auch der Zeitaufwand pro gesammelter Tonne EAG nicht merklich. Zu berücksichtigen ist die Kostenallokation im Fall des Wertstoffmobils, da damit auch Problemstoffe gesammelt werden und die Kosten daher nicht rein zur Sammlung der EAG verwandt werden. Dies relativiert die hohen Kosten und führt zu einer besseren Bewertung. Auch die EAG-Tonne als Holsystem erfordert drei Mitarbeiter (einen Fahrer, zwei Lader). Damit reduziert sich zwar der oben berechnete Zeitaufwand pro gesammelten 1.000 kg, da die obige Rechnung für einen Lader aufgestellt wurde. Gleichzeitig erhöhen sich die Personalkosten jedoch deutlich, da für jeden Beschäftigten oben erwähnte Leistungen zu erbringen sind.

Auch wenn es sich beim Wertstoffhof um ein Bringsystem handelt ist er ebenso personalintensiv, da er während der kompletten Öffnungszeiten von geschultem Personal betreut werden muss. Je nach Größe des Wertstoffhofs variiert die Anzahl der Beschäftigten. Auch hier ist wie beim Wertstoffmobil der Aspekt der Kostenallokation zu berücksichtigen, da auch andere Abfallarten gesammelt werden, was die Bewertung verbessert.

Für die Depotcontainersammlung wird ein Kranwagenfahrer benötigt, der die Depotcontainer entleert und den Inhalt zu den Erstbehandlern fährt. Die Kosten hierfür bewegen sich im mittleren Bereich. Ein Betreiber gab an, dass die wöchentliche Sammeltour, bei der im Schnitt 4,6 t EAG eingesammelt werden, durchschnittliche Kosten von 650 € inklusive Transport anfallen, was einen Schnitt von 141 €/t ergibt (Quelle: persönliche Kommunikation mit Betreiber 2014). Mit Mehrkammerfahrzeugen lassen sich zudem andere Abfallfraktionen wie Altpapier oder Altglas zeitgleich einsammeln, wodurch ähnlich wie bei Wertstoffmobil und Wertstoffhof die Kosten relativiert werden.

Am wenigsten personalintensiv sind die Sammlungen von EAG beim Handel und in öffentlichen Gebäuden bzw. am Arbeitsplatz. Hierfür reicht in der Regel eine Person. Bei einer Rückgabe im Handel fällt zusätzlicher Aufwand an, da das dort arbeitende Personal die abgegebenen Geräte in die Gitterboxen im Lagerraum bringen muss. Dieser Aufwand hält sich jedoch im Vergleich zu anderen Sammelsystemen in Grenzen.

Tabelle 68: Bewertung des Unterkriteriums Personal (€)

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	gering	7
EAG-Tonne	eher mittel	5
Händlersammlung gesamt	gering	7
Händlersammlung > 400 m^2	gering	7
Wertstoffmobil	Eher hoch	4
Wertstoffhof	eher mittel	5
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	eher mittel	5

4.5.3.4.7 Fläche

Die Kosten für die Flächeninanspruchnahme der Sammelsysteme halten sich bei allen Systemen in engen Grenzen. Dies liegt zum einen daran, dass es sich dabei um öffentliche Flächen handelt und teilweise überhaupt gar keine direkten Kosten anfallen, zum anderen weil die Flächen, die in Anspruch genommen werden, sehr klein sind.

Das Wertstoffmobil befindet sich zeitlich begrenzt an verschiedenen Orten, bei denen es sich in der Regel um öffentliche Plätze handelt, für die von den örE keine Platzmiete gezahlt werden muss.

Auch bei der Sammlung in öffentlichen Gebäuden fallen keine Kosten an, ebenso wie bei der Sammlung am Arbeitsplatz, da die Initiative meist von den über die Flächen verfügenden Unternehmen selber ausgeht. Vorausgesetzt es steht genügend Platz für einen Standort auf dem eigenen Grundstück zur Verfügung, fallen auch für die EAG-Tonne keine Platzmietkosten an.

Depotcontainer werden, wie schon mehrfach erwähnt, von den Betreibern am liebsten auf Containeraltstandorten aufgestellt, die sich in der Regel auf öffentlichem Grund befinden. Dadurch fallen auch dafür keine weiteren Kosten an. In Ausnahmefällen kann es dazu kommen, dass private Flächen angemietet werden und entsprechend Kosten generiert werden, bei keinem der befragten Betreiber war dies jedoch bislang der Fall. So gibt ein Betreiber sogar an, dass auch für Standorte auf Supermarktplätzen bislang keine Platzmietkosten anfallen (Quelle: persönliche Kommunikation mit BetreiberIn 2014).

Die Kosten für die Sammlung bei Händlern werden insgesamt auch als gering angesehen. Jedoch wird von Händlerseite, wie bereits erwähnt, das Argument angeführt, dass die Kosten aufgrund der hohen Mietpreise bzw. der Umsatzrendite pro Quadratmeter in den Innenstadtlagen hoch seien und die Flächen nicht mehr eingeschränkt als Verkaufsfläche zur Verfügung stünden (Take-e-way 2012).

Tabelle 69: Bewertung des Unterkriteriums Fläche (€)

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	keiner - minimal	9
EAG-Tonne	keiner	10

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Händlersammlung gesamt	gering	7
Händlersammlung > 400 m²	gering	7
Wertstoffmobil	keiner	10
Wertstoffhof	keiner - minimal	9
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	keiner	10

4.5.3.4.8 Sortierung

Die Kosten für die Sortierung werden bei allen Systemen, die keine direkte Personalbetreuung haben, als ungefähr gleich intensiv eingeschätzt. Anders bewertet werden das Wertstoffmobil und der Wertstoffhof, da das dort anwesende Personal die entgegengenommenen Geräte bereits sortieren kann bzw. im Falle des Wertstoffhofs den Verbrauchern sagen kann, wo die Geräte korrekt abgelegt werden. Für alle anderen Systeme fällt Aufwand an, beispielsweise Fehlwürfe oder andere Abfallarten aus der gesammelten Menge herauszufiltern.

Tabelle 70: Bewertung des Unterkriteriums Sortierung (€)

Sammelsystem	Wert	Zielerfüllungsfaktor Zf
Depotcontainer	eher hoch	4
EAG-Tonne	eher hoch	4
Händlersammlung gesamt	eher hoch	4
Händlersammlung > 400 m²	eher hoch	4
Wertstoffmobil	sehr gering	8
Wertstoffhof	sehr gering	8
Öffentliche Gebäude/Arbeitsplatz	eher hoch	4

Abbildung 44 stellt eine Zusammenfassung der oben erläuterten Kriterien und eine Bewertung für die Sammelsysteme bei einer Gewichtung von 100 % auf das Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ dar.

Abbildung 44: Ergebnisse der NwA für Oberkriterium Wirtschaftlichkeit & Aufwand bei Gewichtung 100 %

Kriterien			Gewichtung (%)		Depotcontainer		EAG-Tonne		Händlersammlung gesamt		Händlersammlung > 400 m²		Wertstoffmobil		Wertstoffhof		Sammlung Arbeitsplatz/ öff. Gebäude	
			Gf (%)	TGf (%)	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN
V Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten Anschaffung	38,3	21,67	5	108	6	130	7	152	7	152	2	43,3	1	21,7	8	173
		Flächenverfügbarkeit		8,33	7	58,3	8	66,7	6	50	7	58,3	10	83,3	0	0	9	75
		Rechtlicher Aufwand		8,33	7	58,3	8	66,7	9	75	9	75	9	75	5	41,7	9	75
	Erfassungsaufwand	Personal	61,7	28,33	7	198	5	141,7	7	198	7	198	4	113,3	5	142	5	142
		Sortierung		18,33	4	73,3	4	73,3	4	73,3	4	73,3	8	146,7	8	147	4	73,3
		Fläche		15	9	135	10	150	7	105	7	105	10	150	9	135	10	150
Zwischennutzwert V						632		628,3		653		662		611,7		487		688

Quelle: eigene Darstellung

4.5.4 Sensitivitätsanalyse

Beim Blick auf die Ergebnisse der NwA sieht man, dass die Systeme die Zielerreichung in den verschiedenen Kriterien zu einem unterschiedlichen Grad erfüllen und stark variieren. Während die Sammlung mit Depotcontainern und der EAG-Tonne im Oberkriterium „Erreichbarkeit“ sehr gut bis überragend abschneiden, ist die Zielerfüllung für die anderen Oberkriterien nur mittelmäßig. Andersherum verhält es sich bei dem Wertstoffmobil und dem Wertstoffhof, die beim Oberkriterium „Erreichbarkeit“ unterdurchschnittlich schlecht abschneiden, bei den Oberkriterien „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ sowie „Zustand“ gut bis überragend abschneiden, jedoch beim Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ die Ziele wiederrum unterdurchschnittlich erfüllen. Ein anderes Bild ergibt sich bei der Variante „Händlersammlung gesamt“ und bei der Sammlung am Arbeitsplatz bzw. in öffentlichen Gebäuden, die beide durch alle Kriterien hinweg sehr konstant gut bis sehr gut abschneiden, wobei die „Händlersammlung gesamt“ mit Ausnahme des Oberkriteriums „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ dominiert. Die Variante „Händlersammlung > 400 m^2“ schneidet im Oberkriterium „Erreichbarkeit“ deutlich schlechter ab, als die andere Variante der Händlersammlung, unterscheidet sich in den anderen Oberkriterien jedoch gar nicht bis kaum von der „Händlersammlung gesamt“ (siehe Abbildung 45).

Abbildung 45: Rangfolge der Sammelsysteme nach Zielerfüllung in den Oberkriterien

Oberkriterium	Depotcontainer	EAG-Tonne	Händlersammlung gesamt	Händlersammlung >400m2	Wertstoffmobil	Wertstoffhof	Arbeitsplatz/ öffentliche Gebäude	Mittelwert mit Variante "Händlersammlung gesamt"	Mittelwert mit Variante "Händlersammlung >400m2"	Standardabweichung mit Variante "Händlersammlung gesamt"	Standardabweichung mit Variante "Händlersammlung >400m2"
Erreichbarkeit	90 %	100 %	80 %	60 %	47 %	37 %	63 %	69,5 %	66,2 %	22,7 %	22,4 %
Akzeptanz & Diebstahlrisiko	58 %	52 %	78 %	78 %	80 %	80 %	72 %	70,0 %	70,0 %	11,1 %	11,1 %
Zustand	55 %	50 %	75 %	75 %	100 %	70 %	70 %	70,0 %	70,0 %	16,1 %	16,1 %
Wirtschaftlichkeit & Aufwand	65 %	68 %	67 %	68 %	72 %	47 %	75 %	65,7 %	65,8 %	9,1 %	9,1 %

Quelle: eigene Darstellung

Diese Zusammenhänge haben Konsequenzen wenn eine Gewichtung der Kriterien erfolgt. So schneiden Depotcontainer und EAG-Tonne deutlich besser ab, wenn eine stärkere Gewichtung auf dem Oberkriterium „Erreichbarkeit“ liegt, das Gesamtergebnis verschlechtert sich jedoch, sobald sich die Gewichtung hin zu den anderen Kriterien verschiebt. Genau umgekehrt verhält es sich für Wertstoffmobil und Wertstoffhof, die von einer stärkeren Gewichtung auf die Kriterien „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ sowie „Zustand“ profitieren.

Die Abbildung zeigt, zu wie viel Prozent ein System die Zielerfüllung im jeweiligen Oberkriterium erfüllt. Bei der Berechnung wurden die Gewichtungen der einzelnen Kriterien noch nicht berücksichtigt, sondern lediglich die Zielerfüllungsfaktoren. Zudem bildet sie die Standardabweichung[54] der Systeme in den einzelnen Kriterien ab, anhand derer sich erkennen lässt, dass besonders eine starke Gewichtung auf die Kriterien „Erreichbarkeit“ sowie „Zustand“ zu einer deutlich unterschiedlicheren Bewertung der Systeme führen wird, wohingegen eine starke Gewichtung auf das Kriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ in einer geringeren Ausdifferenzierung resultiert.

Mit diesen Erkenntnissen lassen sich nun einige Varianten mit verschiedenen Gewichtungen auf den einzelnen Kriterien durchspielen. Eine solche Sensitivitätsanalyse ist wichtig, um den Grad der Abhängigkeit des Ergebnisses von der Gewichtung erkennen zu können und um zu analysieren, wie empfindlich das Gesamtergebnis auf Änderungen reagiert.

Die fünf Oberkriterien wurden bereits beim Paarvergleich in drei Gruppen zusammengefasst und den unterschiedlichen Zielen zugeordnet sind. Diese Gruppen werden nun verschiedenartig gewichtet. Die Oberkriterien „Erreichbarkeit“ und „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ werden hierbei mit einem Verhältnis von 55:45 (aufgrund der Gewichtungen aus dem Paarvergleich) zusammengefasst, da sie beide zur Zielerfüllung „Erhöhung der Sammelquoten“ und „reduzierter Aufwand“ beitragen. Es ergibt sich demnach der Vergleich „Erreichbarkeit“ + “Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ : „Zustand“ : „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“.

Die verschiedenen Gewichtungsvarianten sind in Abbildung 46 dargestellt.

[54] Bei der Standardabweichung handelt es sich um ein Streuungsmaß, welches darüber informiert, wie weit die Werte einer Verteilung vom arithmetischen Mittel entfernt liegen. Je höher die Standardabweichung, desto mehr Einfluss hat das Kriterium auf die Ausdifferenzierung des Gesamtergebnisses (Kuckartz et al. 2010).

Abbildung 46: Gewichtungsvarianten der Oberkriterien und Rangfolge der Sammelsysteme mit Variante „Händlersammlung gesamt“

Variante	Gewichtung (%)	Depotcontainer	EAG-Tonne	Händlersammlung gesamt	Wertstoffmobil	Wertstoffhof	Sammlung Arbeitsplatz/ öff. Gebäude
A	80 : 20 : 0	702,9	712,1	785,7	684	582,9	673,6
B	70 : 30 : 0	683,8	685,6	781,3	723	597,5	676,9
C*	60 : 5 : 35	693,2	704,0	743,0	627	537,5	676,1
D*	50 : 10 : 40	678,2	683,9	733,7	647	541,5	678,8
E*	40 : 10 : 50	667,3	670,2	719,5	648	534,8	681,0
F*	35 : 5 : 60	665,9	669,8	707,6	629	520,8	681,4
G	30 : 30 : 40	640,0	630,9	724,7	726	570,7	685,4
H	20 : 10 : 70	645,4	642,9	691,3	649	521,4	685,2
I	10 : 10 : 80	634,4	629,2	677,1	650	514,7	687,4

Quelle: eigene Darstellung

Es wird ersichtlich, dass die Variante „Händlersammlung gesamt“ in den meisten Gewichtungsvarianten überdurchschnittlich gut abschneidet und im Vergleich unter den Systemen an erster Stelle liegt. Erst bei einer Gewichtung von 30:30:40 bzw. 10:10:80 zugunsten des Kriteriums „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ erfolgt eine Veränderung der Rangfolge an der Spitze. Bei ersterer Variante erhält das Wertstoffmobil aufgrund der starken Gewichtung auf das Kriterium „Zustand“ knapp die beste Bewertung. Es ist fraglich, ob eine solche Gewichtung Sinn macht, da sie zwei Unterkriterien sehr viel Gewicht einräumt. Bei der zweiten Variante wird die „Händlersammlung gesamt“ vom System „Sammlung am Arbeitsplatz/in öffentlichen Gebäuden“ übertroffen. Bei allen anderen Gewichtungsvarianten ist die „Händlersammlung gesamt“ das System mit der höchsten Punktzahl und schneidet auch im Vergleich zur Alternativvariante „Händlersammlung > 400 m²“ besser ab (siehe Tabelle 71). Der Abstand zwischen diesen beiden Varianten wird umso geringer, je weniger Gewicht auf dem Oberkriterium „Erreichbarkeit“ liegt, da sich diese hier am deutlichsten unterscheiden.

Vergleicht man die Variante „Händlersammlung > 400 m²“ mit den anderen Sammelsystemen, ergibt sich in der Rangfolge ein deutlich heterogeneres Bild (siehe Abbildung 47). Das Sammelsystem „Händlersammlung > 400 m²“ liegt hier bei keiner der Gewichtungsvarianten an erster Stelle. Mit stärkerer Gewichtung auf die Oberkriterien „Erreichbarkeit“ und „Akzeptanz“ schneidet die EAG-Tonne hier vergleichsweise gut ab, je mehr sich die Gewichtung zum Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ verschiebt, wird das Sammelsystem „Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude“ stärker.

Abbildung 47: Gewichtungsvarianten der Oberkriterien und Rangfolge der Sammelsysteme mit Variante „Händlersammlung > 400 m²“

Variante	Gewichtung (%)	Depotcontainer	EAG-Tonne	Händlersammlung >400m2	Wertstoffmobil	Wertstoffhof	Sammlung Arbeitsplatz/ öff. Gebäude
A	80 : 20 : 0	702,9	712,1	693,6	684	582,9	673,6
B	70 : 30 : 0	683,8	685,6	700,6	723	597,5	676,9
C*	60 : 5 : 35	693,2	704,0	676,8	627	537,5	676,1
D*	50 : 10 : 40	678,2	683,9	679,4	647	541,5	678,8
E*	40 : 10 : 50	667,3	670,2	677,6	648	534,8	681,0
F*	35 : 5 : 60	665,9	669,8	672,3	629	520,8	681,4
G	30 : 30 : 40	640,0	630,9	693,5	726	570,7	685,4
H	20 : 10 : 70	645,4	642,9	674,1	649	521,4	685,2
I	10 : 10 : 80	634,4	629,2	672,3	650	514,7	687,4

Quelle: eigene Darstellung

Um eine ausgewogene Berücksichtigung aller Oberkriterien – auch im Hinblick auf die Anzahl ihrer Unterkriterien - zu erreichen, empfiehlt sich jedoch eine Orientierung an den Varianten C-F. Die Rangfolge unter den Systemen bei Berücksichtigung der Variante „Händlersammlung gesamt“ ändert sich bei diesen Gewichtungsvarianten kaum, bei der Verwendung der Variante „Händlersammlung > 400 m²“ dagegen stärker. Jedoch wird auch erkennbar, dass bei der ersten Variante der Abstand zwischen der erstplatzierten „Händlersammlung gesamt“ und dem jeweils viertplatzierten System innerhalb dieser Gewichtungsvarianten nur maximal 66,9 und minimal 41,8 Punkte bzw. 6,7 % und 4,2 %, und auch der Abstand zur zweitplatzierten Sammlung nur maximal 49,7 und minimal 26,2 Punkte bzw. 5,0 % und 2,6 % beträgt. Bei der Variante „Händlersammlung > 400m²“ sind diese Abstände sogar noch deutlich geringer. Diese teilweise geringen Abstände machen es daher zwingend erforderlich, sich die Ergebnisse und den Einfluss der Unterkriterien genauer anzuschauen.

Die Abweichung der Nutzwerte der Kriterien zwischen den Systemen ist ein Maß für die Unterscheidungskraft eines Kriteriums und lässt Aufschlüsse darüber zu, inwieweit das Kriterium zur Ausdifferenzierung zwischen den Systemen beigetragen hat. Die größte Abweichung bei den für die jeweiligen Systeme gewichteten Oberkriterien gibt es bei der „Erreichbarkeit“ (6,3 Punkte) und beim „Zustand“ (5,0 Punkte). Auch hieran lässt sich erkennen, dass diese beiden Kriterien den größten Einfluss auf die Ausdifferenzierung der Ergebnisse hatten. Dagegen traten die geringsten Abweichungen beim Kriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ (2,8 Punkte) und beim Kriterium „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ (2,8 Punkte) zutage, was auf einen geringeren Einfluss dieser beiden Kriterien auf das Endergebnis schließen lässt.

Tabelle 71: Durchschnittliche Zielerfüllungsgrade, Mittelwerte und Standardabweichungen der Sammelsysteme

Sammelsystem	Oberkriterium Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Oberkriterium Zustand	Oberkriterium Akzeptanz & Diebstahl	Oberkriterium Erreichbarkeit
Depotcontainer	6,5	5,5	5,8	9,0
EAG-Tonne	6,8	5,0	5,2	10,0
Händlersammlung gesamt	6,7	7,5	7,8	8,0
Händlersammlung > 400 m²	6,8	7,5	7,8	6,0
Wertstoffmobil	7,2	10,0	8,0	4,7
Werkstoffhof	4,7	7,0	8,0	3,7
Arbeitsplatz/Öffentliche Gebäude	7,5	7,0	7,2	6,3
Mittelwert: mit Händlersammlung gesamt	6,6	7,0	7,0	6,9
Mittelwert: mit Händlersammlung > 400 m²	6,6	7,0	7,0	6,6
Standardabweichung: mit Händlersammlung gesamt	0,9	1,6	1,1	2,3
Standardabweichung: mit Händlersammlung > 400 m²	0,9	1,6	1,1	2,2
Größte Abweichung	2,8	5,0	2,8	6,3

Eine Analyse der Mittelwertabweichungen der Systeme gibt zudem Ausschluss darüber, welche Kriterien ausschlaggebend für die Ergebnisse der einzelnen Systeme sind. Zu diesem Zweck wurden die Mittelwerte der Zielerreichungsgrade über alle Systeme gebildet und die Abweichungen für jedes System errechnet. Kriterien mit hohen Abweichungen haben einen großen Einfluss auf das Ergebnis gehabt, solche mit niedrigeren Abweichungen einen geringeren Einfluss. Im Folgenden wird eine Analyse für jedes bewertetes System vorgenommen. Positive Abweichungen tragen dazu bei, dass das System besser abschneidet, negative Abweichungen verschlechterten das Gesamtergebnis. Zunächst werden die Abweichungen der Oberkriterien betrachtet, dann die der Unterkriterien.

4.5.5 Depotcontainer

Die Analyse für die Sammlung mit Depotcontainern zeigt, dass das Oberkriterium „Erreichbarkeit“ die Bewertung in hohem Maße positiv beeinflusst, wohingegen die Oberkriterien „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ und „Zustand“ einen negativen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Besonders das Kriterium „Erfassung verschiedener Altgerätearten“ erfüllt die Zielerreichung im Vergleich zu den anderen Systemen unterdurchschnittlich. Aufgrund der sehr guten Bewertung bei den Unterkriterien „zeitliche Verfügbarkeit“, „Personal“ und „Lage/zurückzulegender Weg“ und „Lokalisierungsaufwand“ kommt das System als mögliche Sammelalternative in Betracht, da es den Aufwand für die Verbraucher immens reduziert und die Anzahl der Sammelstellen aufgrund der sehr guten Flächenverfügbarkeit merklich erhöht werden können.

Tabelle 72: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Depotcontainer

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterium	Erreichbarkeit	2,1 (*2,4)
	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	-0,1
	Akzeptanz & Diebstahlrisiko	-1,2
	Zustand	-1,5
Unterkriterium	zeitliche Verfügbarkeit	4,3
	Personal	1,5
	Lage/zurückzulegender Weg	1,2 (*1,7)
	Lokalisierungsaufwand	0,7 (*1,2)
	Flächenverfügbarkeit	0,3 (*0,2)
	Kosten für Anschaffung	0,2
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Fläche	-0,2
	Diebstahlrisiko	-0,3
	rechtlicher Aufwand	-0,8
	Fehlwurfquote	-1,3
	Sortierung	-1,3
	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	-1,7
	Vermüllung des Standorts	-2,0
	Erfassung verschiedener Altgerätearten	-3,7

* Abweichung vom Mittelwert bei Variante „Händlersammlung > 400m^2“

4.5.6 EAG-Tonne

Ähnlich wie bei der Depotcontainersammlung sind bei der EAG-Tonne das Oberkriterium „Erreichbarkeit“ für die überdurchschnittlich positive und die Oberkriterien „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ bzw. „Zustand“ für die negative Beeinflussung des Gesamtergebnis ausschlaggebend, mit dem Unterschied das beide Pole noch stärker vom Mittelwert divergieren als beim Depotcontainer. Beim Oberkriterium „Erreichbarkeit“ erreicht die EAG-Tonne die volle Punktzahl und bietet damit die größtmögliche Bequemlichkeit für die Verbraucher. Nachfolgend weist das System jedoch Schwächen auf, die diese Stärken relativieren. Hervorzuheben sind das hohe Diebstahlrisiko, die hohe Fehlwurfquote und die hohen Kosten für Sortierung.

Tabelle 73: Mittelwertabweichung der Kriterien bei EAG-Tonne

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterium	Erreichbarkeit	3,1 (*3,4)
	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	-0,1
	Akzeptanz & Diebstahlrisiko	-1,8
	Zustand	-2,0
Unterkriterium	zeitliche Verfügbarkeit	4,3
	Lokalisierungsaufwand	2,7 (*3,2)
	Lage/zurückzulegender Weg	2,2 (*2,7)
	Flächenverfügbarkeit	1,3 (*1,2)
	Kosten für Anschaffung	1,2
	Fläche	0,8
	rechtlicher Aufwand	0,2
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Personal	-0,5
	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	-0,7
	Vermüllung des Standorts	-1,0
	Sortierung	-1,3
	Fehlwurfquote	-3,3
	Erfassung verschiedener Altgerätearten	-3,7

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
	Diebstahlrisiko	-4,3

4.5.7 Händlersammlung gesamt/ Händlersammlung > 400 m²

Die Variante „Händlersammlung gesamt“ kann in allen Oberkriterien positive Werte aufweisen, wobei kein Kriterium besonders heraussticht. Mit Blick auf die Unterkriterien zeigt sich, dass dieses System durch alle Kriterien hinweg punkten kann, was für seine Ausgewogenheit spricht. Lediglich beim Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ schneiden die Unterkriterien „Flächenverfügbarkeit“, „Sortierung“ und „Fläche“ unterdurchschnittlich ab, was jedoch durch die positive Bewertung der Unterkriterien „Personal“ und „Kosten für Anschaffung“ aufgewogen wird. Besonders hervorzuheben ist die gute Bewertung bei den Kriterien „Lokalisierungsaufwand“, „Lage/zurückzulegender Weg“ und „Erfassung verschiedener Altgerätearten“. Dadurch reduziert sich der Aufwand für die Verbraucher deutlich und lässt erwarten, dass das System gut angenommen wird. Dieser Vorteil gegenüber den anderen Sammelsystemen kehrt sich mit der Variante „Händlersammlung > 400 m²“ jedoch ins Gegenteil um. Die Unterkriterien „Lokalisierungsaufwand“ und „Lage/zurückzulegender Weg“ schneiden hierbei im Vergleich deutlich schlechter ab. Die Bequemlichkeit für die Verbraucher wird dadurch vermutlich sinken.

Tabelle 74: Mittelwertabweichung der Kriterien bei „Händlersammlung gesamt“/ “Händlersammlung > 400 m2“

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterien	Erreichbarkeit	1,1 (*-0,6)
	Zustand	1,0
	Akzeptanz & Diebstahl	0,8
	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	0,2 (*0,2)
Unterkriterium	Erfassung verschiedener Altgerätearten	3,3
	Kosten für Anschaffung	2,2
	Lokalisierungsaufwand	1,7 (*-0,8)
	Personal	1,5
	Lage/zurückzulegender Weg	1,2 (*-1,3)
	rechtlicher Aufwand	1,2
	Diebstahlrisiko	0,7
	Fehlwurfquote	0,7

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
	zeitliche Verfügbarkeit	0,3
	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	0,3
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Vermüllung des Standorts	0,0
	Flächenverfügbarkeit	-0,7 (*0,2)
	Sortierung	-1,3
	Fläche	-2,2

* Abweichung vom Mittelwert bei Variante „Händlersammlung > 400m2“

4.5.8 Wertstoffmobil

Das Wertstoffmobil sticht vor Allem beim Oberkriterium „Zustand“ hervor, kann aber auch beim Kriterium „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ punkten. Hier zeigen sich überragende Bewertungen bei den Kriterien „Qualitätsbeeinträchtigung“, „Diebstahlrisiko“, „Fehlwurfquote“ und „Vermüllung des Standorts“, was alles auf die Personalpräsenz zurückzuführen ist. Die Unterkriterien des Oberkriteriums „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ zeigen ein sehr heterogenes Bild, sowohl mit deutlich positiven als auch mit deutlich negativen Abweichungen. Besonders negativ ins Gewicht fällt die Bewertung im Oberkriterium „Erreichbarkeit“, da insbesondere die Unterkriterien „zeitliche Verfügbarkeit“ und „Lokalisierungsaufwand“ stark unterdurchschnittlich abschneiden. Neben diesen Schwächen sind die Kosten für eine Neuanschaffung und die Personalkosten die Hauptgründe, weshalb dieses System für eine substantielle Erhöhung der Sammelstellen nicht in Betracht kommt und allenfalls zusätzlich in Erwägung gezogen werden sollte (nicht zuletzt aufgrund der anderen Problemstoffe, die mit dem Wertstoffmobil gesammelt werden können).

Tabelle 75: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Wertstoffmobil

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterium	Zustand	3,0
	Akzeptanz & Diebstahlrisiko	1,0
	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	0,0
	Erreichbarkeit	-2,6 (*-2,3)

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Unterkriterium	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	3,3
	Flächenverfügbarkeit	3,3 (*3,2)
	Diebstahlrisiko	2,7
	Fehlwurfquote	2,7
	Sortierung	2,7
	Vermüllung des Standorts	2,0
	rechtlicher Aufwand	1,2
	Fläche	0,8
	Erfassung verschiedener Altgerätearten	0,3
	Lage/zurückzulegender Weg	0,2 (*0,7)
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Personal	-1,5
	Kosten für Anschaffung	-2,8
	Lokalisierungsaufwand	-3,3 (*-2,8)
	zeitliche Verfügbarkeit	-3,7

* Abweichung vom Mittelwert bei Variante „Händlersammlung > 400m2“

4.5.9 Wertstoffhof

Der Wertstoffhof kann nur beim Oberkriterium „Akzeptanz & Diebstahlrisiko“ leicht positiv abschneiden, wohingegen das Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ und besonders das Oberkriterium „Erreichbarkeit“ negativ in das Gesamtergebnis einfließen. Während die Unterkriterien bei „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ heterogener verteilt sind und mit dem Kriterium Sortierung auch einen stark positiven Wert aufzeigt, fließen die Unterkriterien von „Erreichbarkeit“ komplett negativ in das Gesamtergebnis ein und zeigen die großen Schwachpunkte dieses Systems auf. Hervorstechen kann das System, da alle Arten von EAG abgegeben werden können und eine geringe Fehlwurfquote zu verzeichnen ist. Die unverhältnismäßigen Kosten für eine Neuetablierung von Wertstoffhöfen und die ungenügende Flächenverfügbarkeit schließen die Option Wertstoffhof als zentrale Möglichkeit zur Erhöhung der Sammelstellen jedoch aus.

Tabelle 76: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Wertstoffhof

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterium	Akzeptanz & Diebstahlrisiko	0,8
	Zustand	0,0
	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	-1,6
	Erreichbarkeit	-3,3
Unterkriterium	Erfassung verschiedener Altgerätearten	3,3
	Sortierung	2,7
	Fehlwurfquote	1,7
	Vermüllung des Standorts	1,0
	Diebstahlrisiko	0,7
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Fläche	-0,2
	Personal	-0,5
	Lokalisierungsaufwand	-1,3 (*-0,8)
	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	-1,7
	rechtlicher Aufwand	-2,8
	zeitliche Verfügbarkeit	-3,7
	Kosten für Anschaffung	-3,8
	Lage/zurückzulegender Weg	-4,8 (*-4,3)
	Flächenverfügbarkeit	-6,7 (*-6,8)

* Abweichung vom Mittelwert bei Variante „Händlersammlung > 400m2“

4.5.10 Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude

Die Ergebnisse für die Sammlung am Arbeitsplatz/öffentlichen Gebäuden zeigen sich relativ ausgeglichen. Die positivsten Werte finden sich im Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“, wobei die Kriterien „Kosten für Anschaffung“ und „Flächenverfügbarkeit“ besonders positiv hervorstechen. Jedoch werden diese positiven Werte durch einige negative Werte im selben Kriterium relativiert. Die Oberkriterien „Akzeptanz & Diebstalrisiko“ und „Zustand“ haben wenig Einfluss auf die Ausdifferenzierung des Endergebnisses gehabt, wohingegen das Oberkriterium „Erreichbarkeit“ leicht negativ ist

und mit dem Unterkriterium „zeitliche Verfügbarkeit“ auch die deutlichste negative Abweichung aufweist. Dieser Aspekt ist als deutlicher Nachteil für dieses System zu bezeichnen. Das System erweist sich insgesamt als recht ausgeglichen, mit einzelnen Schwächen bei jedem Oberkriterium, hat gegenüber den anderen Systemen insbesondere beim Oberkriterium „Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ Vorteile.

Tabelle 77: Mittelwertabweichung der Kriterien bei Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude

Kategorie	Kriterium	Abweichung vom Mittelwert (gewichtet)
Oberkriterium	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	0,9
	Akzeptanz & Diebstahlrisiko	0,4
	Zustand	0,0
	Erreichbarkeit	-0,6 (*-0,3)
Unterkriterium	Kosten für Anschaffung	3,2
	Flächenverfügbarkeit	2,3 (*2,2)
	rechtlicher Aufwand	1,2
	Fläche	0,8
	Diebstahlrisiko	0,7
	Erfassung verschiedener Altgerätearten	0,3
	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung	0,3
	Lage/zurückzulegender Weg	0,2 (*0,7)
	Transparenz über Verbleib	0,0
	Datenschutz	0,0
	Vermüllung des Standorts	0,0
	Lokalisierungsaufwand	-0,3 (*0,2)
	Fehlwurfquote	-0,3
	Personal	-0,5
	Sortierung	-1,3
	zeitliche Verfügbarkeit	-1,7

* Abweichung vom Mittelwert bei Variante „Händlersammlung > 400m2“

4.6 Pfand

Beim Pfand handelt es sich um ein ökonomisches System zur Beeinflussung von Altproduktströmen. Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass finanzielle Anreize Sammelmenge bestimmter untersuchter Elektrokleingeräte an Althandys zu erhöhen (Wuppertal Institut & IASS Potsdam 2013, Ongondo & Williams 2011). In der Politik werden ökonomische Anreizsysteme als mögliche Instrumente zur Erhöhung der Sammelmenge diskutiert. So forderte die Grünen-Politikerin Katrin Göring-Eckardt im März 2013 die Einführung eines Handypfands in Höhe von 10 € (DIE WELT, 2013). Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012) schlägt ebenfalls die Einführung eines Handypfands vor. In einem Interview sprach sich der Vorsitzende Joachim Faulstich für eine Pfandhöhe zwischen 30 und 100 € aus (heise.de, 2012).

Die Bewertung eines Pfandsystems muss den Aufwand für das ökonomische Anreizsystem im Verhältnis mit der zusätzlich gesammelten Altgerätemenge betrachten. Generell muss dabei beachtet werden, dass das ökonomische Anreizsystem noch keine Vorgaben zu dem physischen Sammelsystem bedingt (also z. B. zur Dichte und Erreichbarkeit der Sammelstellen) und dass die Potenziale zur Erhöhung von Sammelmengen durch ökonomische Anreize deutlich von den bisher erfassten Anteilen und vom Komfort des bestehenden Sammelsystems abhängig sein werden.

4.6.1 Erfahrungen mit Pfandsystemen für EAG

In Österreich erfolgte eine Bepfandung bestimmter Elektrogeräte bis zum Inkrafttreten der nationalen Umsetzung der WEEE-Richtlinie. So wurde 1990 die Kennzeichnung, Rücknahme und Pfanderhebung von bestimmten Lampen und 1992 die Rücknahme von Kühlgeräten durch Verordnungen geregelt[55]. Die Pfandhöhe lag bei 10 Schilling für Lampen und 1.000 Schilling für Kühlgeräte. Die Erhebung des Pfandes erfolgte über den Handel, der die Produkte an Letztverbraucher abgab. Hiermit ging die Pflicht zur Rücknahme einher. Die Produkte erhielten eine Kennzeichnung mit dem Wort „Pfand“. Alternativ wurden beim Verkauf Pfandmarken ausgegeben.

Eine quantifizierende Auswertung der Steuerungseffekte der Pfandmodelle liegt nicht vor.

4.6.2 Exkurs: Pfand bei Verpackungen und Batterien

Im Folgenden werden Erfahrungen mit dem Pfand auf Verpackungen und Autobatterien als Referenzpunkte dargestellt. Dabei geht es vor allem um die Darstellung des Pfandsystems selbst. Von daher kann die Tatsache, dass sich die Zielsetzung der Bepfandungen in Bereichen unterscheiden, in den Hintergrund treten[56].

Beim Einwegpfand erfolgt die Erfassung durch eine Kombination der EAN und des Logos der Deutsche Pfandsystem GmbH (DPG), das in Sicherheitsfarben aufgedruckt ist. Jeder

[55] 408. Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Rücknahme von Kühlgeräten, in Bundesgesetzblatt Österreich 1992, S. 1671; 512. Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie vom 19. Juli 1990 über die Kennzeichnung, Rücknahme und Pfanderhebung von bestimmten Lampen, in Bundesgesetzblatt Österreich 1990, S. 3333.

[56] Schlacke (2012) führ t z. B. an: „In der Form eines gesetzlichen Zwangspfandes auf Fahrzeugbatterien gemäß § 10 Abs. 1 BattG soll es eine umweltgefährdende Entsorgung dieses Produktes durch den Verbraucher verhindern.305 Die Zwangsbepfandung von Einweggetränkeverpackungen gemäß § 9 VerpackV soll dagegen das Einwegsystem gegenüber dem Mehrwegsystem für Verbraucher unattraktiver machen.

Hersteller, der pfandpflichtige Produkte vertreibt, muss dazu die EAN des Produkts gegen ein Entgelt bei der DPG anmelden. Der entsprechende Verwaltungsaufwand wird durch das System finanziert.

Die Abrechnung der Pfandbeträge erfolgt über ein Pfandkonto. Dieses ist vom Erstinverkehrbringer (in der Regel der Hersteller bzw. Abfüller) zu eröffnen. Das Pfand wird in der Wertschöpfungskette von Akteur zu Akteur bis zum Konsumenten weitergereicht.

Nachdem der Konsument das Leergut zurückgebracht hat, kümmert sich der Handel üblicherweise um die Kompaktierung des Leerguts oder den Transport zu einem Zählzentrum und bekommt im Gegenzug das Pfand vom Pfandkonto. Das Leergut wird dann Recyclingunternehmen zugeführt. Vom Pfandschlupf profitiert der Eröffner des Pfandkontos, also der Hersteller, finanziell (Hartlep & Souren, 2011).

In einer Studie der Unternehmensberatung Roland Berger werden die jährlichen Kosten für das Pfandsystem bei Einwegverpackungen auf 793 Millionen € geschätzt. Dazu kommen einmalige Einrichtungskosten in Höhe von 726 Millionen €. Diese Kosten werden zum großen Teil vom Handel getragen (Roland Berger, 2008). Der Hauptverband des Deutschen Einzelhandels schätzt die Anschaffungskosten für Automaten und Infrastruktur auf 1,5 Milliarden €, dazu kommen noch jährliche Betriebs- und Wartungskosten von jährlich 500 Millionen €. Diese Schätzungen werden von der DPG als „konservativ“ bezeichnet (DIE WELT, 2007). Die Höhe der Kosten eines Pfandsystems hängen in erster Linie von der Art der Erfassung ab. So entstehen beim Einwegpfand hohe Kosten durch die große Anzahl der Rücknahmestellen. Die Anschaffungskosten für einen Rücknahmeautomaten werden auf 10.000 bis 20.000 € geschätzt (DIE WELT, 2007; Handelsblatt, 2010).

Beim Pfand auf Autobatterien ist das Erfassungssystem einfacher strukturiert. Die Batterieverordnung schreibt einen Pfand in Höhe von 7,50 € pro Autobatterie vor. Vertreiber können die Erstattung des Pfands allerdings von der Rückgabe eines Pfandbelegs abhängig machen. Hier existieren keine zentrale Datenbank und kein übergeordnetes Verwaltungssystem. Das Pfand wird als Umsatz verbucht und nicht über ein Pfandkonto. Einzelne Händler entwickeln jeweils individuelle Rücknahmelösungen.

Viele Versandhändler erstatten das Pfand beispielsweise nur, wenn der Verbraucher die Altbatterie bei einem Wertstoffhof abgibt und sich den Empfang quittieren lässt. Laut einem Onlineanbieter von Autobatterien machen davon aber lediglich 5 % der Verbraucher Gebrauch. Der Rest der Verbraucher gibt die Batterie entweder bei einem anderen Händler beim Kauf einer neuen Batterie ab, bringt sie zum Wertstoffhof ohne das Pfand zurückzufordern oder lagert die Batterie zu Hause. Eine Versendung der Altbatterie per Post ist aus rechtlichen Gründen nicht möglich. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass die Ankaufspreise für Altbatterien in etwa der Pfandhöhe entsprechen, so dass einem Händler kein großer ökonomischer Vor- oder Nachteil durch die Annahme der Batterien entsteht (Batteriepool.de, Pers Comm, 2013).

Mögliche Ausgestaltung eines Pfandsystems für kleine EAG in Deutschland

Im Falle eines Pfandsystems für kleine EAG in Deutschland muss hinsichtlich des Erfassungssystems sichergestellt sein, dass Geräte, für die Pfand hinterlegt wurde von anderen Geräten, für die kein Pfand hinterlegt wurde[57] unterschieden werden können. Eine ausschließliche Erfassung durch Produktmerkmale, wie Form und Größe erscheint schwer umsetzbar, weil Hersteller dafür spezielle Hinweise ausschließlich auf Produkten für den bepfandeten Marktbereich anbringen müssten (je nach regionalem Zuschnitt z. B. Deutschland oder EU). Die Erfahrungen aus der Umsetzung des Batteriepfandes zeigen, dass eine Kombination aus Pfandbon und Erfassung von Produkteigenschaften denkbar ist. Das Erfassungssystem umfasst dabei neben dem Handel auch zusätzliche Erfassungspunkte (örE), durch die eine händlerunabhängige Rückgabe möglich ist.

4.6.3 Diskussion der Pfandhöhe

Arbeiten zur wissenschaftlichen Analyse der Pfandhöhe bei Elektrokleingeräten sind nur sehr begrenzt verfügbar. Siegmann (2013) erarbeitete in praktischen Versuchen in Bezug auf die Bepfandung von Mobiltelefonen die in der folgenden Tabelle dargestellten Schlussfolgerungen. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass der empfundene Wert des Mobiltelefons einen wesentlichen Aspekt bei der Rückgabe darstellt (s. u.).

[57] Etwa weil sie erstmals im Ausland in Verkehr gebracht wurden oder weil sie vor Einführung der Pfandpflicht verkauft wurden,

Tabelle 78: Varianten der Pfandhöhe für Mobiltelefone

Pfand-höhe	Wirkung
Sehr niedriger Pfand: 5€	Dieser Betrag entspricht dem subjektiven Aufwand, der durchschnittlich beim Verbraucher für die Abgabe des Handys beim Händler oder durch den Versand per Post anfällt. Dieser Aufwand entspricht nicht unbedingt dem tatsächlichen finanziellen Aufwand, der bei der Rückgabe anfällt. Bei dieser Pfandhöhe würden daher nur Althandys gesammelt, die keinen subjektiven Wert mehr für die Verbraucher haben.
Niedriger Pfand: 10€	Bei dieser Pfandhöhe würde es sich vor allem um Handys handeln, die defekt sind oder auf keinen Fall mehr genutzt werden und ansonsten auch nicht auf dem Gebrauchtgerätemarkt gehandelt würden. Es würde sich größtenteils um Handys handeln, die mindestens sechs Jahre alt sind.
Mittlerer Pfand: 25€	Bei einer Pfandhöhe von 25€ würde etwa die Hälfte der Versuchsteilnehmer ihr Althandy abgeben. Dabei würde es sich vor allem um Handys mit einer geringen Wiedernutzungswahrscheinlichkeit handeln. Allerdings würde vermutlich ein deutlich größerer Anteil an Handys zeitnah gesammelt im Vergleich zum niedrigen oder sehr niedrigen Pfand.
Hoher Pfand: 50€	Mit einer Pfandhöhe von 50€ erreicht man vermutlich mit vereinzelten Ausnahmen alle Verbraucher, die die Wiederverwendungswahrscheinlichkeit ihres Handys als eher gering einschätzen. Darüber hinaus werden möglicherweise auch einige Handys abgegeben werden, die ohne die Existenz eines Pfandsystems noch auf verschiedene Art und Weise genutzt worden wären. Dazu gehört die Nutzung als Ersatzhandy, der Verkauf auf dem Gebrauchtgerätemarkt sowie das Verschenken an Freunde oder Bekannte.
Sehr hoher Pfand: 100€	Ein Pfand von 100€ wird vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012) vorgeschlagen. Mit dieser Pfandhöhe würden vermutlich fast alle Handys erreicht, die zur Zeit nicht genutzt werden. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass viele Handys, die grundsätzlich noch genutzt oder weiterverkauft werden können, abgegeben werden.

Quelle: Siegmann (2013)

Für andere kleine EAG besteht ein empfundener Wert (sei es als emotionaler Wert oder wg. der Überlegung einer möglichen späteren Nutzung oder als Ersatzgerät) in den meisten Fällen nicht in dieser Form. Hieraus kann geschlossen werden, dass ein niedriger bzw. sehr niedriger Pfandbetrag ausreichend wäre, um Mengensteuerungseffekte zu erreichen.

4.6.4 Auswirkungen eines Pfandsystems für kleine EAG

4.6.4.1 Umwelt

Höhere Sammelmengen bei Elektrokleingeräten führen zu größeren Verwertungsmengen und damit zu einer größeren Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen. Größere Sammelmengen einiger Gerätetypen könnten auch den ökonomischen Einsatz neuer effizienterer Verwertungstechnologien ermöglichen. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass durch die Einführung eines Pfands weniger Elektrokleingeräte über den Hausmüll entsorgt werden. Je nach Art und Anzahl der Sammelstellen ist von unterschiedlichen Logistikaufwendungen auszugehen. Durch eine Bündelung der Sammelroutinen für verschiedene Altprodukte ist eine Minimierung des Aufwandes zu erwarten.

4.6.4.2 Verbraucher

Der Pfandbetrag ist während der Nutzungsphase des Geräts gebunden und steht dem Verbraucher somit nicht zur Verfügung. Es kann außerdem davon ausgegangen werden, dass der reale Wert des Pfandbetrags während der Nutzungszeit durch Inflation sinkt. Außerdem entsteht für den Verbraucher ein zusätzlicher logistischer Aufwand, etwa durch das Aufbewahren eines Pfandbons und je nach Ausgestaltung durch die Beförderung des Geräts zum Ort an dem das Pfand ausbezahlt wird. Sollte der logistische Aufwand dem Verbraucher als zu groß erscheinen und verzichtet er auf die Rückgabe der Geräte, entstehen ihm Kosten in der Höhe des Pfands.

Im Hinblick auf persönliche Daten in Mobiltelefonen wird es für eine Realisierung eines Pfandsystems für Mobiltelefone wichtig sein dass die Geräte technisch so ausgestattet sind, dass jeder Nutzer bei Bedarf seine persönlichen Daten problemlos löschen bzw. überschreiben kann.

4.6.4.3 Gesellschaft

Beim Weiterverkauf erzielen gebrauchte Mobiltelefone niedrige Preise. Der durchschnittliche Wert von ReUse-Telefonen aus der Sammelaktion in Bayern lag bei 13 € (Gander 2013). Der Wiederverkaufspreis anderer kleiner EAG streut sehr breit. Je nach Pfandhöhe kann sich eventuell eine abschreckende Wirkung auf die Nachfrage nach Gebrauchtgeräten ergeben (Siegmann 2013, Schlacke 2012). Die Festsetzung der Pfandhöhe als prozentualer Wert vom Neupreis könnte diesen Effekt möglicherweise abmildern, würde jedoch zu erhöhtem administrativem Aufwand führen.

4.6.4.4 Hersteller & Handel

Für Hersteller und Handel wären die Konsequenzen eines Pfandsystems gemischt. Ihnen entstünde je nach Sammelstelle zusätzlicher logistischer Aufwand durch die Erfassung der Pfandgeräte. Wie viele Händler davon betroffen wären hängt stark von der Implementierung ab (z. B. durch die Bestimmungen zur Größengrenze der verpflichteten Händler). Für eine Gleichverteilung der Zusatzkosten für den Handel müssten Ansätze entwickelt werden.

Durch den Prozess der Pfandrückgabe entsteht für den Handel je nach Ausgestaltung allerdings auch eine zusätzliche Interaktionsmöglichkeit mit dem Verbraucher, die er dazu nutzen kann, den Verbraucher enger an sich zu binden.

Für den Hersteller hätte ein funktionierendes Pfandsystem den Vorteil, dass Sekundärrohstoffe in größerer Menge verfügbar wären, was die Marktsituation bei einigen kritischen Metallen entspannen würde.

Die Einführung eines Pfandsystems hat das Potenzial zu einem starken Einfluss auf den Gebrauchtgerätemarkt. Ein Pfand könnte dazu führen, dass Geräte, die auf dem Markt nur noch geringere Preise erzielen können, von Verbrauchern nicht mehr zum Weiterverkauf angeboten werden, sondern direkt dem Sammelsystem zugeführt werden. Auch das Verschenken alter Geräte an Freunde oder Bekannte könnte weniger attraktiv werden. Laut einer Studie von Nokia aus dem Jahr 2011 entscheiden sich derzeit zumindest 27 % der Verbraucher dafür, ihr altes Gerät zu verkaufen oder zu verschenken (Tanskanen, 2012). Besonders eingeschränkt würde vermutlich der Verkauf gebrauchter Geräte ins Ausland. Hier müsste eine Lösung gefunden werden, die ermöglicht, dass funktionstüchtige Geräte nach Ausbezahlung des Pfands noch ins Ausland exportiert werden können.

4.6.4.5 Bestehende Sammelsysteme

Die Einrichtung eines Pfandsystems würde der Betrieb karitativer Sammelsysteme in ihrer jetzigen Form beeinflussen. Durch die Pfandauszahlung entstünde ein erhöhter administrativer Aufwand. Es könnte sich ein Rückgang der abgegebenen Mengen ergeben, wenn keine Pfandauszahlung erfolgt. Andererseits könnten sich neue Betätigungsfelder für diese Sammelsysteme ergeben, wenn beispielsweise der Pfandbetrag gespendet wird. Daher erscheint es sinnvoll, Vertreter derartiger Sammelsysteme in die Planungen für ein Pfandsystem miteinzubeziehen.

Für andere Sammelsysteme, zum Beispiel für Wertstoffhöfe ergeben sich ebenfalls zusätzliche administrative Aufwendungen. Durch die Auszahlung des Pfandbetrages an Wertstoffhöfen könnten je nach Ausgestaltung des Systems mit einer Erhöhung der Besucheranzahl und somit auch mit einer Erhöhung der Sammelmenge bei anderen Gerätekategorien gerechnet werden.

Die Sammlung über „anonyme Systeme“ wie z. B. Depotcontainer würde durch die fehlende Möglichkeit zur Pfandauszahlung behindert. In den USA sind für Mobiltelefone automatische Annahme- und Auszahlungsmaschinen in Betrieb (ECO ATM). Diese sind jedoch kostenintensiv und ob eine Möglichkeit zur Nutzung auch für andere kleine EAG besteht ist nicht bekannt.

4.6.4.6 Schlussfolgerung

Das derzeitige Erfassungssystem für kleine EAG in Deutschland ist geprägt durch eine relativ geringe Anzahl von Sammelstellen der örE, die vergleichsweise kurze Öffnungszeiten haben (im Durchschnitt 19 Stunden pro Woche) und die zusätzliche Wege von den Endverbrauchern verlangen. Die Rücknahme im Handel ist bisher nur in wenigen Fällen etabliert, die Erfassung über Depotcontainer im öffentlichen Raum erfolgt in verschiedenen Kommunen in Testphasen.

Für Mobiltelefone wurden verschiedene Sammelstrukturen aufgebaut, die teilweise aktionsorientierten zeitlich begrenzten Charakter hatten und teilweise Permanentsysteme waren. Bei den Sammelaktivitäten für Mobiltelefone wurde auch deutlich, dass durch eine Erhöhung der Anzahl der Erfassungsstellen nicht notwendigerweise eine entsprechende Erhöhung der Sammelmengen einherging. Als notwendig wurde erachtet, dass

die verbraucherfreundliche Gestaltung des Erfassungssystems mit einer umfassenden Kommunikation kombiniert wird. Die Notwendigkeit einer effektiven Kommunikationsarbeit wird als umso höher eingeschätzt, je mehr die Endverbraucher das Gefühl haben, ein „wertvolles“ Gerät zu haben (sowohl emotional als auch materiell). Für geringwertige Standardgeräte (z. B. Toaster), bei denen ein Entledigungswille vorhanden ist, kann erwartet werden, dass die Verbesserung des Erfassungssystems auch mit weniger aufwändigem Kommunikationskonzept als bei den Mobiltelefon-Aktionen vergleichsweise stärker wirken (Szyszkowitz 2015, zu Mobiltelefonen auch DUH 2013).

Von einer Einführung der Bepfandung kleiner Elektrogeräte könnte die Erhöhung der erfassten Altgerätemengen erwartet werden sowie die Verkürzung der Zwischenlagerung bei Geräten, die als „wertvoll“ empfunden werden (emotional bzw. materiell). Hieraus kann bezogen auf Mobiltelefone erwartet werden, dass durch die verstärkte Erfassung jüngerer Handys die Wiederverwendung gestärkt wird. Der administrative Aufwand ist jedoch als wesentliches Hemmnis zu sehen.

Der Status quo der Erfassung von Elektrokleingeräten zeigt sehr deutliche Optimierungspotenziale. Dies betrifft

- die Dichte der Sammelstellen,
- die Benutzerfreundlichkeit hinsichtlich der Öffnungszeiten und zurückzulegenden Wege und
- die Bequemlichkeit hinsichtlich des Aufwandes für die Recherche von Abgabemöglichkeiten.

Weiterhin wurde bisher in Deutschland kein umfassendes Kommunikationskonzept umgesetzt, das das Thema der Erfassung von Elektrokleingeräten integrierend abdeckt. Vielmehr erfolgte eine Vielzahl punktueller Kommunikationen mit unterschiedlichen Richtungen und Zielsetzungen, die auch in vielen Fällen zeitlich limitiert war und nicht auf kontinuierliche Bewusstseinsbildung abzielte.

Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, zunächst auf der Grundlage der Vorgaben der WEEE-Richtlinie und im Rahmen des neuen ElektroG, der Weiterentwicklung der Sammlung durch die örE, der Einbindung des Handels sowie eines integrierenden Kommunikationskonzeptes die Entwicklung der erfassten Mengen von Elektrokleingeräten zu verfolgen und in einem fokussierten Monitoring zu erfassen. Sollte sich dabei ergeben, dass die Mengenentwicklung nicht den Erwartungen entspricht, sollte eine Prüfung von Wegen zur Implementierung ökonomischer Instrumente wie dem Gerätepfand erfolgen.

Für Hersteller, Händler und Verbraucher hat die Einführung eines Pfandsystems für Elektrokleingeräte aufgrund der entstehenden Kosten und des Aufwands eher negative Konsequenzen. Gleichzeitig können diese beiden Gruppen durch ihr Verhalten die Sammelmengen von Elektrokleingeräten mit beeinflussen. Vor dem Hintergrund einer drohenden Pfandeinführung könnten Verbraucher, aber vor allem Hersteller und Händler zusätzliche Initiativen ergreifen, um die Sammelmenge an Elektrokleingeräten zu erhöhen. Daher könnte ein Gesetzesbeschluss sinnvoll sein, der die Einführung eines Pfands auf Elektrokleingeräte vorsieht, falls die gesammelte Menge an Elektrokleingeräten zu diesem Zeitpunkt nicht eine bestimmte Menge/einen bestimmten Anteil der in Verkehr gebrachten Menge erreicht. Solch ein Gesetz würde eine Lücke in der WEEE-Richtlinie

schließen, die lediglich Anreize für die Sammlung schwerer Geräte setzt (alle Sammelziele beziehen sich auf einen Gewichtsanteil pro Sammelgruppe).

4.6.5 Fazit

Ziel der Analyse war es, konkrete Fragen hinsichtlich einer Verbesserung der Sammeltätigkeiten von EAG und einer damit einhergehenden Erhöhung der Sammelquoten besser beantworten zu können. Die Zusammenfassung der Ergebnisse in dem folgenden Kapitel orientiert sich an den Fragestellungen, die in der Aufgabenstellung des Projektes RePro benannt waren.

4.6.5.1.1 Ist es sinnvoll, für Geräte/ Gerätegruppen oder Bauteile zusätzliche Erfassungswege zu schaffen?

Die Analyse zum Status quo der Erfassung von RePro-EAG zeigte die vergleichsweise geringe Verfügbarkeit der Erfassungsstellen auf, die zudem das Kriterium der „Bequemlichkeit“ nur bedingt erfüllen. Die Erfahrungen der in Deutschland durchgeführten Versuche zur Getrenntsammlung von Wertstoffen und die im europäischen Ausland gemachten Erfahrungen zeigen, dass durch die Art des Angebots von Sammelsystemen das Verbraucherverhalten beeinflusst werden kann. Vor allem das Kriterium „Erreichbarkeit“, das sich durch eine Vielzahl von Unterkriterien definiert, spielt dabei eine ausschlaggebende Rolle. Es ist stark davon auszugehen, dass sich die Sammelmengen für EAG erhöhen werden, wenn der Aufwand für die Verbraucher reduziert werden kann. Insbesondere die Frage der Entfernung zur nächsten Sammelstelle und ob es sich um Zusatzwege handelt spielt eine gewichtige Rolle, auch der Lokalisierungsaufwand und die Kontinuität (zeitliche Verfügbarkeit) sind von großer Bedeutung. Wird den Verbrauchern ein in diesem Sinne komfortables Sammelsystem angeboten, so kann entsprechend allen in der Literatur und in den dokumentierten Sammelversuchen dargelegten Erfahrungen mit solchen Systemen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die erfasste Menge von RePro-EAG gesteigert wird. Ein wesentlicher Aspekt bei der Mengenbetrachtung ist die mögliche Verlagerung von Mengen zwischen einzelnen Erfassungswegen. Aus der Perspektive des Ressourcenschutzes wären zusätzliche Sammelsysteme redundant, wenn die dort erfassten Mengen ausschließlich von anderen Sammeloptionen abgezogen werden. Aus der Perspektive der Verbraucherfreundlichkeit ist dies sicherlich anders zu bewerten. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass bei Neueinführung eines Systems mit entsprechender Öffentlichkeitsarbeit wellenartige Mengeneffekte auftreten können, die durch Einmaleffekte einer „Entrümpelung“ der privaten Haushalte entstehen. Versuche mit Depotcontainern zeigen jedoch Erhöhungen der Gesamtsammelquoten, die nicht auf eine Mengenverlagerung schließen lassen.

4.6.5.1.2 Wenn ja, welche?

Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse verdeutlichen, dass eine ausschließliche Festlegung auf ein Sammelsystem nicht sinnvoll ist. Die Ergebnisse liegen teilweise eng beieinander, sodass ein vollständiger Ausschluss von Systemen nicht ableitbar erscheint. Wertstoffhof und Wertstoffmobil zeigten sich als Optionen die am wenigsten geeignet wären, als Solitärsysteme zu einer deutlichen Erhöhung der Sammelmengen zu führen. Vielmehr

legt die Analyse eine Kombinationen aus bereits existierenden Wertstoffhöfen und anderen verschiedenen Sammelsystemen, die der jeweiligen Gebietsstruktur angepasst sind, nahe. Die Variante „Händlersammlung gesamt“ sollte in jedem Fall eine zentrale Rolle spielen, da sie sich in der Bewertung auch mit verschiedenen Gewichtungen als das System mit dem höchsten Zielerreichungsgrad erwiesen hat. Vergleicht man die beiden Varianten der Händlersammlung so fällt auf, dass sie besonders im Oberkriterium „Erreichbarkeit“ stark differieren und die Variante „Händlersammlung gesamt“ besser abschneidet, da in der Alternativvariante „Händlersammlung > 400 m^2“ die Anzahl der Sammelstellen deutlich reduziert ist. Dies bedeutet längere Wege und ein höherer Lokalisierungsaufwand für die Verbraucher, was die Bequemlichkeit, und damit ein Hauptvorteil des Systems, einschränkt.

Zur Rolle des Handels sollte in Betracht gezogen werden, dass eine mögliche Verpflichtung des Handels nicht notwendigerweise vom Handel selbst in der praktischen Durchführung (physische Sammlung) umgesetzt werden müsste. Vielmehr sind auch Lösungen denkbar (und teilweise bereits umgesetzt), bei denen Beauftragte (örE oder private Entsorger) die Erfassung beim Handel durchführen. Der Versandhandel kann seine Verpflichtung umsetzen, indem er entweder einen kostenlosen Versand des Altgerätes organisiert (dies wurde bereits durch einige Internethändler in Deutschland realisiert) und/oder einen finanziellen Beitrag zur Sammlung von EAG durch einen Entsorger leistet.

Die Analyse zeigt, dass es sinnvoll ist, Anforderungen an die Sammlung zu stellen, die das Kriterium der „Erreichbarkeit“ bzw. des Aufwandes für die Endverbraucher als Basis haben. Die Operationalisierung kann über den Parameter „Anzahl von Sammelstellen“ und „Zusatzaufwand für die Wege zur Sammelstelle“ erfolgen. Hinsichtlich der Anzahl der Sammelstellen kann die WEEE-2-Richtlinie als Orientierung herangezogen werden. Entsprechend Art. 5 Abs. 2 der WEEE-2-Richtlinie sollte die Dichte der Sammelstellen mindestens so hoch sein, wie die Anzahl der Filialen, die nach Art. 5 Abs. 2 verpflichtet würden.

Es zeigte sich auch, dass für den Erfolg der Sammlung ein stabiles und auf Dauerhaftigkeit angelegtes Sammelsystem wesentlich ist.

4.6.5.1.3 Nach welchem Kriterium sollten die zu erfassenden Geräte definiert werden (Ressourcenrelevanz, Größe etc.)?

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein komfortables und bequemes Sammelsystem sehr wesentlich auch durch die Einfachheit der getrennten Sammlung definiert wird. Würde der Abgabeaufwand für den Verbraucher durch komplexe Kriterien erhöht, könnte die Nutzungsschwelle des Systems erhöht werden. Anstelle einer Orientierung der Getrenntsammlungskriterien an der Ressourcenrelevanz der Geräte (z. B. gerätebezogen: USB Stick ja, Fernbedienung nein) sollte das Kriterium daher so einfach wie möglich sein. Dabei wird die Größe der Geräte als sinnvolles einfach erfassbares Trennkriterium für die Wahl des Getrenntsammelpfades gesehen. Die im Rahmen des Projektes vor dem Hintergrund der Anforderungen der WEEE-2-RL zur Händlersammlung durchgeführten Untersuchungen zu den Größen der RePro-EAG zeigten, dass eine Kantenlänge von 25 cm zwar viele RePro-EAG abdeckt. z. B. Laptops und PC als besonders ressourcenrelevante Geräte jedoch zu großen Anteil nicht erfasst würden. Die Erfahrungen aus

der Nutzung von Depotcontainern zeigten jedoch, dass mit einer Kantenlänge von 50 cm mehr bzw. zusätzliche RePro-EAG erfasst werden können (z. B. PC, Laptops). Dabei sollten Gerätearten, die bei der Sammlung im Depotcontainer (mit den entsprechenden Entladevorgängen aus dem Depotcontainer in den LKW und aus dem LKW in Schüttung auf die Entladefläche des Erstbehandlers) ein erhöhtes Risiko der Schadstofffreisetzung aufweisen (Hg-haltige Bildschirme) ausgeschlossen werden.

4.6.5.1.4 Gibt es in Deutschland nicht oder weniger etablierte Erfassungswege, die sich in anderen EU-Mitgliedstaaten bereits bewährt haben?

Die Recherchen haben gezeigt, dass sowohl im europäischen Ausland, als auch in Deutschland bereits Erfahrungen mit ergänzenden Sammelsystemen für EAG vorliegen, die eine deutliche Steigerung der Erfassungsmengen erwarten lassen.

Dabei zeigte sich, dass kein spezifisches System für alle regionalen Besonderheiten als Optimum identifiziert werden kann, sondern jeweils ergänzende angepasste Systemkomponenten realisiert werden sollten. Die Sammlung über den Handel zeigt in den anderen Mitgliedstaaten, wo ein entsprechendes Monitoring realisiert wurde, relevante Erfassungsmengen und es erfüllt die Kriterien der „Bequemlichkeit“ vor allem dann, wenn sich hierüber ein dichte Netz der Annahmestellen realisieren lässt. Für Gebiete mit geringer Menge EAG je räumlicher Einheit (z. B. ländlich strukturierte Gebiete) weisen mobile Systeme Stärken auf, jedoch auch vergleichsweise höhere spezifischen Kosten je gesammelter Mengeneinheit, als stationäre Systeme. Die Sammlung über spezielle EAG-Säcke oder –Boxen ist nur dann geeignet, wenn das Diebstahlrisiko minimiert ist oder minimiert werden kann. Dies kann z. B. in Wohnanlagen der Fall sein, in denen nur autorisierte Personen Zugriff auf die Abfälle haben.

4.6.5.1.5 Welche Geräteauswahl bringt über welche Sammelwege den höchsten Nutzen aus Rohstoffschonungssicht?

Die dargestellten Untersuchungen zeigen die große Bedeutung eines dichten und „bequemen“ Sammelsystems für die Endverbraucher auf. Solche Sammelsysteme differenzieren die zu erfassenden Geräte wenig, um keine komplizierte Situation für den Endnutzer zu erzeugen. Solche Systeme, wie z. B. die 0:1-Sammlung im Handel oder auch die Sammlung über ein dichtes Depotcontainernetz unterscheiden anhand der Größe der Geräte unter zusätzlicher Beachtung von Schadstoff- und/oder Gefahrenkriterien. Um aus diesem gemischten Input bei den Erstbehandlern einen optimierten Input für die Behandlungsanlagen zu erzeugen, ist eine Vorsortierung beim Erstbehandler notwendig.

Sollte aus den Anforderungen von ADR[58] eine Getrenntsammlung von akkuhaltigen Geräten ergeben, so wäre hierüber die überwiegende Anzahl der besonders rohstoffrelevanten RePro-EAG betroffen und somit in einer eigenen spezifischen Sammelgruppe erfasst.

Monitore und Fernseher sollten in jedem Fall aus Schadstoffgesichtspunkten getrennt gesammelt werden.

[58] Europäischen Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)

4.6.5.1.6 Wie sollte die Sammlung (inkl. Transport) gestaltet werden – auch hinsichtlich Verbraucherakzeptanz, Erfassungsmenge, -qualität, Aufwand?

Derzeit liegt der wesentliche Transportaufwand für die getrennte Sammlung von EAG beim Verbraucher. Um eine rechtskonforme Getrenntsammlung vorzunehmen, müssen die Endverbraucher derzeit die i.d.R. relativ langen Wege zu den Annahmestellen der örE zurücklegen. Durch die erste Erfassung näher am Verbraucher kann der spezifische Transportaufwand über alle Akteure der Erfassungskette und damit die daraus resultierenden Umweltbelastungen verringert werden. Eine solche Mengenkonsolidierung wird durch die hier empfohlene Sammlung erreicht, indem mehr Sammelstellen zur Verfügung stehen, die näher am Verbraucher sind. Werden Sammelstellen eingerichtet, durch die keine zusätzlichen Wege notwendig werden (z. B. beim Handel), so kann die Umweltbelastung aus dem Transport der RePro-EAG durch die Verbraucher sogar vollständig vermieden werden.

Entsprechend den Ausführungen zur Frage 5 ist eine Differenzierung der Getrenntsammlung notwendig. Sollte eine ADR-konforme Lösung für die Sammlung im Handel und/oder über Depotcontainer gefunden werden, so sind lediglich besonders schadstoffhaltige Geräte (Bildschirmgeräte) separat von den anderen RePro-EAG zu halten.

Für besonders schadstoffhaltige Geräte bzw. ggf. auch für Li-Ionen-Geräte kann die Sammlung über mobile Sammelsysteme wie Schadstoffmobile ergänzt werden.

Für den Transport ab den Sammelpunkten sind etablierte Lösungen bekannt, z. B. bei der Sammlung im Handel die Logistiklösungen von Lightcycle für Gasentladungslampen. Für die Sammlung über Depotcontainer werden inzwischen Lösungen entwickelt, die ADR-Konformität versprechen (z. B. Gitterboxen im Container, ADR-konforme Depotcontainer).

Für Hg-haltige Bildschirme wird die separate Sammlung vorgeschlagen. Die hierzu notwendigen Behälter für die Erfassung bzw. Konsolidierung stehen zur Verfügung.

4.6.5.1.7 Welche Mengen sind zu erwarten? Welchen Beitrag leisten die ressourcenrelevanten EAG zur Erhöhung der Sammelmenge insgesamt mit Blick auf die zukünftigen Ziele der novellierten WEEE-Richtlinie?

Auf der Grundlage der Erfahrungen aus dem europäischen Ausland und den in Deutschland von verschiedenen Akteuren durchgeführten Versuchen kann sicher geschlossen werden, dass in Deutschland durch ein dichtes und komfortables Sammelnetz deutliche Mengensteigerungen erwartet werden können. Eine ausreichend valide Datengrundlage für eine Quantifizierung der gesamtmassenbezogenen Erwartungsmengen über alle Produktkategorien ist jedoch nicht verfügbar.

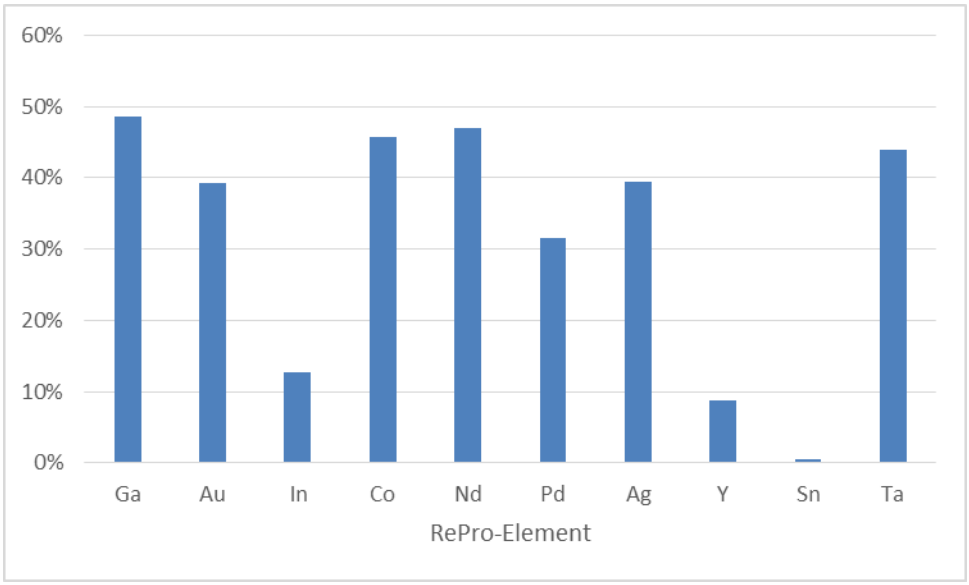
Unter dem Gesichtspunkt der Rohstoffschonung ist eine wesentliche Steigerung der Rohstoffeffizienz durch Rückgewinnung strategischer Rohstoffe durch die optimierte Erfassung der RePro-EAG zu erwarten[59]. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass in einem Szenario zur optimierten Erfassung durch Sammelsysteme, die additiv zu der

[59] Im Jahr 2013 wurden 46 % der iVgM der SG 3+SG 5 der letzten 3 Jahre im System nach ElektroG erfasst (entsprechend 5,6 kg/E*a).

bestehenden Sammlung über die Wertstoffhöfe etabliert werden (Sammlung über Depotcontainer, Sammlung durch den Handel entsprechend WEEE2-Richtlinie, additive variable lokale Systeme und ggf. auch der Sammlung an Erstbehandlungsanlagen), eine Zusatzmenge von rund 3 kg/E*a erwartet werden kann.

Die Erfassungsraten für die verschiedenen RePro-Geräte unterscheiden sich im Status quo sehr deutlich. Gerade die besonders ressourcenrelevanten Gerätearten wie z. B. Laptops, Tablets und Smartphones werden nur zu sehr geringen Anteilen erfasst. Andere Gerätearten wie z. B. Röhrenfernseher und –monitore weisen höhere Quoten auf. Durch die Optimierung der Erfassungssysteme werden daher auch unterschiedliche Mengeneffekte je Geräteart erwartet. Für Yttrium ergibt sich hierdurch eine Steigerung der Erfassung um 9 %, für Gallium um 49 % (siehe auch die folgende Abbildung 48).

Abbildung 48: Steigerung der Erfassungsmengen von RePro-Metallen durch eine optimierte Erfassung



Quelle: eigene Darstellung

Da die zukünftigen Ziele der Sammlung (Novelle WEEE) nicht allein durch die Erhöhung der Sammelmengen der kleinen ressourcenrelevanten EAG erreicht werden können, sollen auch Maßnahmen zur Erhöhung der Sammelmenge insgesamt bearbeitet werden. Hierbei sind beispielsweise illegale Sammlungen und Exporte zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen haben einige Ansätze aufgezeigt, über die dieser Komplex bearbeitet werden sollte:

Über eine verpflichtende 1:1-Rücknahme des Handels kann eine sehr weitgehende Erfassung von Altgeräten erfolgen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass über die optimierte Erfassung von Kleingeräten wie den RePro-Geräten nur vergleichsweise geringe Beiträge zur Steigerung der gesamtmassenbezogenen Ziele der WEEE-2-RL erreicht werden können. Selbst bei einer Erfassungsquote der SG 3 und SG 5 von 90 % der in den letzten 3 Jahren iVgM würde eine Zielvorgabe der Gesamtsammelquoten von 65 % der

iVgM nicht erreicht werden. Eine verbesserte Erfassung großer Haushaltsgeräte in Systemen, die in das Monitoring nach ElektroG einbezogen sind, ist in Bezug auf die gesamtmassenbezogenen Sammelquoten von größerer Bedeutung.
Eine Sammelsystemkomponente, die hier wesentliche mengenrelevante Beiträge liefern könnte, ist die 1:1-Rücknahme durch den Handel. In der verabschiedeten Fassung des ElektroG2 wird jedoch eine 1:1-Rücknahme durch den Handel im Unterschied zur WEEE2-Richtlinie mit einer Mindestverkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte von 400 m^2 verknüpft und so die Anzahl der zur Rücknahme verpflichteten Vertreiber im Vergleich zu den EU-Vorgaben deutlich heruntergesetzt.

Begleitend sollte ein spezifisches und detailliertes Monitoring eingeführt werden. Über das verpflichtende Monitoring zu den Abfallströmen hinaus sollten Gespräche mit dem Handel geführt werden, durch die die gesamten Mengenströme transparent gemacht werden, die vom Endverbraucher zurückgenommen werden (z. B. auch die Geräte, die übernommen werden, wenn Neugeräte ausgeliefert werden). Dies ist wahrscheinlich nur über einen freiwilligen Ansatz in vollem Umfang zu erreichen, da nicht rechtsbindend geklärt ist, ob es sich um ein Altgerät oder ein Gebrauchtgerät handelt, wenn diese Geräte beim Kunden mitgenommen werden.

Weiterhin scheint eine freiwillige Vereinbarung sinnvoll, nach der die vom Endverbraucher entgegengenommenen Geräte nur an zertifizierte ReUse-Betriebe übergeben werden.

Die Sperrmüllsammlung sollte dahingehend optimiert werden, dass eine Abholung von EAG zu festen Terminen nur noch in begründeten Ausnahmefällen durchgeführt werden sollte. Es sollte überprüft werden, ob durch Kooperationen mit gewerblichen und/oder sozialen Betrieben eine kostenlose Abholung der EAG aus den Haushalten organisiert werden kann. Dies kann auch außerhalb der üblichen Arbeitszeiten erfolgen.

Zusätzlich zu beachten ist die Notwendigkeit, für besonders schadstoffrelevante Geräte wie z. B. Flachbildschirm mit Quecksilberhintergrundbeleuchtung erweiterte Sammelsysteme verfügbar zu machen. Hier ist neben der Erfassung bei den Wertstoffhöfen der örE und Systemen wie dem Schadstoffmobil die Erfassung im Handel ein wichtiges Instrument für die Erhöhung der Erfassungsquoten in diesem prioritären Bereich.

4.6.5.1.8 Wie kann die Entsorgungsentscheidung der Verbraucher und Verbraucherinnen beeinflusst werden?

Die Untersuchung zeigte deutlich, dass der zentrale Ansatzpunkt für die Beeinflussung der Entsorgungsentscheidung die Bequemlichkeit des Endverbrauchers bzw. das komfortable Sammelsystem in größerer Nähe zum Verbraucher ist.

Weitere Aspekte der Verbraucherinformation und –motivation werden im Rahmen des Abschnitts zum Kommunikationskonzept behandelt.

4.6.5.1.9 Wie können illegale Sammlungen verhindert werden?

Der Haupttreiber für die illegale Sammlung oder die Sammlung im Graubereich zwischen Gebraucht- und Altgerät, nämlich das ökonomische Gefälle zwischen den Erfassungswegen, wird auch in Zukunft weiter bestehen.

Ein wesentlicher Schritt, um Diebstahl von der Sperrmüllabfuhr zu reduzieren, ist die Umstellung der Sperrmüllsammlung auf Abruf. Da dies schon seit vielen Jahren bekannt ist, erscheint es sinnvoll, dies rechtlich verbindlich zu machen.

Hinsichtlich des Exports zeigt die Erfahrung aus den über 20 Jahren, in denen der Export von EAG ein Thema ist, auch, dass man sich einer verbesserten Situation nur in kleinen Schritten annähern kann. Die Treiber hinter der illegalen Sammlung und dem Export sind zu komplex, als dass ein einzelnes Instrument zu einer Lösung führen kann. Diese notwendigen Schritte wurden in der Studie zum Export von EAG (Sander 2010) entwickelt und werden teilweise realisiert.

Vielversprechend scheint der Ansatz einiger örE zu sein, offensiv in „Konkurrenz“ zu den illegalen Sammlern zu gehen und über ein „besseres System“ in Kombination mit intensiver Öffentlichkeitsarbeit die wichtigste Schaltstelle für Mengenabflüsse in die illegale Sammlung, nämlich das Verbraucherverhalten, zu beeinflussen. Hier ist die Erhöhung der Bequemlichkeit des EAG-Sammelsystems für die Endverbraucher ein sehr wesentliches Element.

Ist eine spezielle Kennzeichnung der Geräte sinnvoll, damit Verbraucher sich ihrer Ressourcenrelevanz bewusst werden und die Altgeräte entsprechenden Verwertungswegen zuführen? Wie sollte diese gestaltet sein?

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Einfachheit des Sammelsystems neben der Nähe zum Verbraucher das zweitwichtigste Erfolgskriterium ist. Um die Nutzungsschwelle des Systems nicht zu erhöhen wird empfohlen, als sehr einfaches Kriterium für das Sammelsystem für RePro-EAG die Größe des Gerätes anzuwenden. Eine Kennzeichnung entsprechend der Ressourcenrelevanz mit der Zielgruppe Endverbraucher kann daher entfallen. Als wesentlicher Ansatz zur Beeinflussung des Verbraucherverhaltens wird vielmehr die Realisierung von Informationskampagnen gesehen.

Sinnvoll erscheint jedoch die Kennzeichnung Hg-haltiger Geräte (Flachbildschirme) mit einem Warnhinweis auf dem Gerät selbst.

4.6.5.1.10 Kann bzw. wie kann mit einer (Wertstoff-)Kennzeichnung zur Zielsetzung beigetragen werden, die ressourcenrelevanten EAG gezielt in die geeigneten Entsorgungspfade zu lenken?

siehe oben Frage 11

4.6.5.1.11 Wie könnte eine (Wertstoff-)Kennzeichnung rechtlich verankert und im bestehenden Regelwerk eingepasst werden?

Siehe oben Frage 11

4.7 Kommunikationskonzept

Die Sammlung von EAG sollte auch durch eine Kommunikationskampagne gefördert werden. Dazu wurden Elemente einer Dachkommunikationskampagne und Kommunikationsbotschaft entwickelt, welche sich theoretisch auch auf unterschiedliche Geräte anpassen lassen. Zunächst werden hier exemplarisch einige existierende Kommunikationskampagnen vorgestellt, Anforderungen an eine Kommunikationskampagne hinsichtlich der Zielgruppe und der Kommunikationsstrategie entwickelt. Auf dieser Basis wurde eine Kommunikationskampagne mit sieben Motiven entwickelt, welche durch die Wahl des Konzepts auf weitere Motive ausgeweitet werden kann.

4.7.1 Entsorgungsverhalten und Getrenntsammlungsmotivation der Verbraucherinnen und Verbraucher

4.7.1.1 Vorgehensweise

Zunächst wurde der Status quo der Sammlung von EAG in Deutschland analysiert, um im Anschluss die Ergebnisse so zu verdichten, dass sie in einer Botschaft handlungsaufforderndsind.

Gegenstand der Kommunikation sollten möglichst unterschiedliche Geräte sein und der Adressatenkreis sollte möglichst groß sein.

4.7.1.2 Getrenntsammlungsbewusstsein

In der Bevölkerungsumfrage zum Umweltbewusstsein in Deutschland 2012 (BMU, UBA 2013) wurde festgestellt, dass die grundsätzliche Bereitschaft zur Mülltrennung fehlt und eine Verhaltensänderung nicht in Betracht gezogen wird.

Aus der Erhebung des „Eurobarometers“ (EU 2014) kann folgendes Fazit gezogen werden:

4.7.1.3 Mülltrennungsverhalten

- Der Anteil der Menschen, die Abfall getrennt sammeln, sank von 2010 auf 2012 von 90 % auf 77 %.
- Nur wenig mehr als die Hälfte der Befragten gibt an, Abfälle gezielt zu vermeiden.
- Im Umgang mit Abfall wollen 64 % der Befragten ihre Verhaltensweise beizubehalten.
- 95 % der in Deutschland Befragten gab an, Elektro- und Elektronikschrott zumindest gelegentlich zu trennen.

4.7.1.4 Mülltrennungseinstellung

- Politisch wird der Abfallvermeidung und Umweltpolitik große Bedeutung beigemessen (Platz zwei nach Wirtschafts- und Finanzpolitik).
- Jeder zweite betrachtet die Abfallvermeidung und Abfalltrennung als wichtigen persönlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz.
- Fast die Hälfte der Befragten begründet Abfalltrennung oder -vermeidung, mit der Wiederverwendbarkeit des Wertstoffes.
- Als Anlass zu mehr Achtsamkeit im Umgang mit Abfall wird aufgeführt, dass neue rechtliche Vorschriften zur Abfalltrennung dies erforderlich machen.

Es besteht ein Misstrauen. denn 77 % der im Eurobarometer befragten Deutschen würden ihren Abfall besser trennen, wenn sie sich sicher wären, dass dieser auch wirklich recycelt würde. Die Hälfte der Befragten würde sich durch mehr und bessere Rücknahmestellen sowie Recyclinganlagen zur Abfalltrennung motivieren lassen, ebenso viele durch finanzielle Anreize.

Gleichzeitig wird von einem Teil der Befragten (37 %) mehr Aufklärung verlangt, wie und wo man Abfall trennen kann.

4.7.2 Bestehende Kommunikationskampagnen zur Sammlung von Elektroaltgeräten

Bei der Analyse bestehender Kommunikationskampagnen (siehe auch exemplarische Darstellungen der Kampagnen im Anhang Kapitel 10.8) zeigte sich, dass sich die meisten bestehenden, erfolgreichen Kampagnen auf einzelne Elektrogerätearten fokussieren (z. B. Föhn, Batterie, Rasierer - Kampagne „Wegwerfen gefährdet unsere Umwelt“ oder Energiesparlampe – Kampagne „Helle Birnen entsorgen richtig“), den Umweltaspekt in den Vordergrund stellen und selten ein Belohnungsversprechen (= intrinsische Motivation, die eine Handlung auslöst) für die Zielgruppen transportieren (siehe z. B. Kampagne „Alte Handys für die Havel“, hier fließt Geld von der E-Plus-Gruppe an den NABU). Es wurde deutlich, dass bei den Zielgruppen nur wenige, konzentrierte und möglichst emotionale Botschaften ankommen.

Exemplarische Kampagnen sind

- Fokus auf Althandys
  „Machen Sie den Reservehandy-Check“, Althandysammlung in Bayern 2012, Quelle: Ergebnisreport Bay. Staatsmin. für Umwelt und Gesundheit, Althandysammlung
- Fokus auf Elektrokleingeräte und Batterien Sammlung
  „Wegwerfen gefährdet unsere Umwelt“, Altstoffsammlung in Österreich 2010, Umweltprofis Österreich, Quelle: www.ooe-bav.at/start.html
- Fokus auf Elektrogeräte allgemein
  „Elektrogeräte sind kein Sperrmüll“, Karlsruhe 2009, Amt für Abfallwirtschaft, Quelle: www.karlsruhe.de/abfall
- Fokus auf Energiesparlampen
  „Helle Birnen entsorgen richtig“, Wien 2011, www.abfall.wien.at
- Initiativen
  „love green“, Erste deutschlandweite Medieninitiative zum Thema Nachhaltigkeit, www.love-green.de, 2011
  „Alte Handys für die Havel“, NABU & E-Plus-Gruppe, www.nabu.de, 2011

4.7.3 Anforderungsprofil für die Kommunikationskampagne

Daher wurde folgendes Anforderungsprofil für die Kommunikationskampagne entwickelt (Tabelle 79).

Tabelle 79 Anforderungsprofil für Kommunikationskampagne

Anforderungen	Leitfragen
Die Zielgruppen für das Thema grundsätzlich sensibilisieren	Was steckt in EAG, was kann daraus gewonnen werden?
Die Kernzielgruppen für eine Kampagne bestimmen	Wer hat das Potenzial, zum Botschafter zu werden?
Die Frage nach dem Mehrwert beantworten	„Was ist für mich persönlich drin bzw. was habe ich davon?“
Antworten liefern	Warum entsorgen, wohin entsorgen, wie entsorgen?
Konzentration der Botschaften	Wenige, leicht, verständlich, ohne erhobenen Zeigefinger
Auf wenige, aber entscheidende Geräte fokussieren	In welchen EAG sind die meisten RePro-Metalle enthalten?

4.7.3.1 Auswahl der Zielgruppen

Als Zielgruppen aus dem kampagnenrelevanten Privatbereich wurden definiert:

- Einpersonenhaushalte/Singles
- Mehrpersonenhaushalte/Familien
- Kinder/Jugendliche, Schüler
- Senioren (60+)
- Kleine Gewerbebetriebe

Die Zielgruppeneinteilung ergab sich aus der Analyse der Fokusgruppenbefragung. In diesen fünf Zielgruppen konnten merklich unterschiedliche Emotionen je nach Alter und Lebenssituation voneinander abgegrenzt werden. Überschneidungen sind dabei möglich.

4.7.3.2 Gruppierung der Elektrogeräte

In gesättigten Märkten müssen Hersteller zur Steigerung von Absatzzahlen neue, innovative Produkte anbieten. Der Durchsatz kann in denjenigen Märkten erhöht werden, in welchen sich Produktlebenszyklen verkürzen. Neue gleichartige Geräte lösen einander ab, (z. B. schnellere und leistungsstärkere PC) und neue Gerätearten ersetzen bisherige Geräte mit vergleichbaren Funktionen (z. B. PC durch Laptop, Laptop durch Tablet, Tablet und Laptop durch Smartphones). Die Verbraucher folgen und fördern diesen Trend (siehe auch BMUB 2014).

Diese Situation wurde bei der Entwicklung von Elementen einer Kommunikationskampagne aufgenommen, und es wurden auf der Basis der geschätzten Verweildauern grob vier Gerätegruppen gebildet. Die Gerätegruppen mit einer kurzen Nutzungsdauer sind nämlich von größerer emotionaler Relevanz. Das Ziel dieser Kampagne war, eine möglichst breite Zielgruppe anzusprechen, wobei einerseits die Bedeutung des Produkt und andererseits die erzielbare Aufmerksamkeit abgewogen werden musste. Haushaltsgroß-

geräte, Haushaltskleingeräte, Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik, Geräte der Unterhaltungselektronik wurden als geeignet erachtet. Für diese vier unterschiedlichen Gruppen von Elektrogeräten wurden im Folgenden jeweils separate Zielgruppenanalysen durchgeführt.

Für eine spätere Kampagnenaussteuerung wurden die Geräte in vier unterschiedliche emotional charakterisierende Klassen gruppiert:

- Geräte fürs Leben,
- Geräte fürs technische Leben,
- Geräte fürs umfassende technische Leben,
- Geräte fürs emotionale Leben.

4.7.3.3 Analyse der Zielgruppen und ihrer Motive nach Gerätearten

Um Verhaltensweisen der Zielgruppen zur Getrenntsammlung von Elektroaltgeräten herauszufinden, wurden zwei Studien mit entsprechenden Untersuchungen aus Deutschland (Sinus 2013, www.sinus-institut.de, Heidelberg 2013), (TDW 2013, www.tdw.de, Typologie der Wünsche, Hubert Burda Media, München 2013) herangezogen. Daraus ergaben sich folgende fünf Zielgruppen:

- Einpersonenhaushalte
- Mehrpersonenhaushalte
- Kinder/Jugendliche/Schüler
- Senioren (60+)
- kleine Gewerbebetriebe

Der Vergleich dieser Studien wurde durch eine Fokusgruppenbefragung (mit 6 Personen unterschiedlichen Alters) ergänzt. Die Ergebnisse der Analyse bildeten die Basis für die Auswertung im Bereich der privaten Haushalte. Dazu wurden Assoziationsketten gebildet, Barrieren und Motivatoren definiert und die Zielgruppen mit der Relevanz der einzelnen Gerätegruppen geclustert.

Abschließend wurde ein umfangreicher Zielgruppen-Vergleich (Matching) durchgeführt, welcher aus den nachfolgenden Faktoren bestand:

- Basismotivation der Zielgruppe
- Höhe der Motivation/Reaktionsgrad
- Lösungsweg aus Problemstellung
- Emotionale Grundhaltung
- Informationsverhalten aus Problemstellung
- Botschaften/Mehrwertversprechen bei Entsorgung
- Mögliche Kommunikationsmaßnahmen (z. B. Online, Print)

Die Zielgruppenanalysen für die aufgeführten Gruppen von Elektrogeräten sind in Tabelle 80 bis Tabelle 83 dargestellt.

Haushaltsgroßgeräte werden von den Zielgruppen überwiegend als „Geräte fürs Leben“ (teils sogar als überlebenswichtig) eingestuft. Diese werden als lebensnotwendig angesehen, oftmals über die gesamte Produktlebensdauer verwendet und bei defekt relativ

schnell ersetzt. Es stellt sich die Herausforderung, den hohen Entsorgungsdruck aufgrund des Platzbedarfs schnell und korrekt zu lösen.

Da Kinder und Jugendliche kaum Kaufentscheidungen über Haushaltsgroßgeräte treffen, wurden sie nicht als Zielgruppe für diese Gerätegruppe betrachtet.

Tabelle 80 Haushaltsgroßgeräte: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften

Fragestellung	Einpersonenhaushalte	Mehrpersonenhaushalte = Kernzielgruppe	Kinder/ Jugendliche/ Schüler	Senioren (60+)	Kleine Gewerbebetriebe
Basismotivation/ Grundproblem	Gerät ist alt oder kaputt, Ersatz des alten Gerätes steht an - wohin mit dem alten Gerät?	Gerät ist alt oder kaputt, Ersatz des alten Gerätes steht an - wohin mit dem alten Gerät?	-	Gerät ist alt oder kaputt, Ersatz des alten Gerätes steht an - wohin mit dem alten Gerät?	Gerät ist alt oder kaputt, Ersatz des alten Gerätes steht an - wohin mit dem alten Gerät?
Wie hoch ist die Motivation, zu reagieren	Mittel, es gibt Ausweichmöglichkeiten (z. B. bei kaputter Waschmaschine in den Waschsalon, bei Freunden oder Eltern waschen). Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Hoch, da mehrere Personen, oftmals (Klein-) Kinder. Es gibt keine Ausweichmöglichkeiten außer Neuanschaffung. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	-	Hoch, es gibt keine Ausweichmöglichkeit außer Neuanschaffung. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Niedrig, da meist Ersatzmöglichkeiten vorhanden, die den eigentlichen Betrieb nicht massiv einschränken. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.
Wie gehe ich an die Lösung heran	Spontan, reaktiv	Strategisch, planerisch	-	Spontan, reaktiv	Mittelfristig, planerisch

Fragestellung	Einpersonenhaushalte	Mehrpersonenhaushalte = Kernzielgruppe	Kinder/ Jugendliche/ Schüler	Senioren (60+)	Kleine Gewerbebetriebe
Was macht das emotional mit mir	Bin genervt (Zeit, Transport, Geld)	Chance auf eine Verbesserung, Optimierung des alten Zustands	-	Ängstlich, überfordert, hilfesuchend	Nervig, will sich auf Anderes konzentrieren, muss auf jeden Fall Zeit- und kosteneffizient sein
Wie ist das Informationsverhalten (aus der Problemstellung heraus)	Frage Freunde, Familie oder recherchiere im Internet, was zu tun ist (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage	Frage in der eigenen Familie (Mann/Frau, Mitbewohner), Bekannte, Freunde, Internet (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage	-	Frage Kinder/Enkel, die sich dann dem Problem annehmen (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage)	Wird von Assistent/Sekretär geregelt, recherchiert im Internet, macht Vorschläge (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage)
Welche Botschaften müssen wir vermitteln - Wie lautet das Mehrwert- bzw. Belohnungsversprechen bei Entsorgung	Wir helfen Dir, Deine EAG schnell, sicher, umweltschonend und fachgerecht zu entsorgen.	Ziel: schnellstmöglich altes Gerät weg - neues Gerät da. Von uns bekommst Du die bestmöglichen Infos, damit Du Dein EAG zu dem von Dir benötigten Zeitpunkt schnell, sicher, umwelt-schonend, fachgerecht entsorgen kannst.	-	Wir helfen Dir, die sicherste und schnellste Lösung zu finden, um Dein EAG umweltschonend und fachgerecht zu entsorgen.	Wir helfen Dir, problemlos, umweltgerecht, kosteneffizient, schnell, sicher und umweltschonend Dein EAG zu entsorgen.

Fragestellung	Einpersonenhaushalte	Mehrpersonenhaushalte = Kernzielgruppe	Kinder/ Jugendliche/ Schüler	Senioren (60+)	Kleine Gewerbebetriebe
Wie könnten die Kommunikationsmaßnahmen aussehen	Information/Service: Online-Plattform mit Content Marketing unter dem Aspekt „schnell finden“ Image: Kampagne mit Flyern, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“	Information/Service: Online-Plattform mit Content Marketing unter dem Aspekt „schnell finden“ Image: Kampagne mit Flyern, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“	-	Information/Service: Online-Plattform mit Content Marketing unter dem Aspekt „schnell finden“ Image: Kampagne mit Flyern, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“	Information/Service: Online-Plattform mit Content Marketing unter dem Aspekt „schnell finden“ Image: Kampagne mit Flyern, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“

Haushaltskleingeräte werden von den Zielgruppen überwiegend als „Geräte fürs technische Leben“ eingestuft. Diese Geräte werden häufig ohne Defekt ersetzt, wenn die technische Funktionalität durch ein neueres, innovativeres Gerät verbessert werden kann. Es stellt sich die Herausforderung, das eher geringe Entsorgungsbewusstsein anzusprechen und in Relation zur Gerätegröße in eine korrekte Entsorgungshandlung zu überführen.

Tabelle 81 Haushaltskleingeräte: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften

Fragestellung	Einpersonenhaushalte Mehrpersonenhaushalte = Kernzielgruppe Kinder/Jugendliche/Schüler Senioren (60+) Kleine Gewerbebetriebe
Basismotivation/ Grundproblem	Ersatzinvestition geplant oder Gerät defekt - wohin mit dem alten Gerät?

Fragestellung	Einpersonenhaushalte Mehrpersonenhaushalte = Kernzielgruppe Kinder/Jugendliche/Schüler Senioren (60+) Kleine Gewerbebetriebe
Wie hoch ist die Motivation, zu reagieren	Niedrig: es gibt Nutzungsalternativen; schnelle Beschaffung eines Ersatzes jederzeit möglich, Involvement ist niedrig.
Wie gehe ich an die Lösung heran	Spontan, reaktiv, akzeptables Problem, das schnell zu lösen ist.
Was macht das emotional mit mir	Bereitet keine Sorgen, man muss sich nicht tiefergehend damit beschäftigen. Eher geringe Kosten für Ersatzinvestition, daher tragbar.
Wie ist das Informationsverhalten (aus der Problem-stellung heraus)	Fehlende Informationslage! Entsorgungsfrage nachrangig, da Kleingerät; geringes Bewusstsein, was mit dem EAG zu tun ist, schlimmstenfalls wandert es in die Hausmülltonne, bestenfalls wird bei Hersteller und Handel nachgefragt.
Welche Botschaften müssen wir vermitteln - Wie lautet das Mehrwert- bzw. Belohnungsversprechen bei Entsorgung	Verhaltens- und Bewusstseinsänderung schaffen! Viel Information und Aufklärung bieten! Geringes Problembewusstsein vorhanden (ich schädige die Umwelt ohne es zu wissen); dadurch geringes bis kein Informationsbedürfnis. (Achtung, auch Kleingeräte sind EAG, die nicht in den Hausmüll gehören). Bei fachgerechter Entsorgung das Richtige tun und die Ressourcen und Umwelt schonen.
Wie könnten die Kommunikationsmaßnahmen aussehen	Information/Service & Aufklärung: Online-Plattform mit Content Marketing, „Hinterfragen des eigenen Handelns und Aufmerksamkeit des Handelns in der Zukunft“. Unterstützung zum Finden einer komfortablen (korrekten) Entsorgungslösung. Information: Aufkleber für Hausmüll-Tonne mit dem Hinweis, dass etwas falsch gemacht wird, wenn die Kleingeräte in der Restmüll-Tonne entsorgt werden Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“

Die Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik werden von den Zielgruppen als „Geräte fürs umfassende technische Leben“ eingestuft. Diese Geräte enthalten häufig sehr persönliche Daten und werden auch nach Ersatz bei Defekt oder durch ein technisch besseres Gerät weiter aufbewahrt. Es stellt sich die Herausforderung, den

geringen Entsorgungsdruck in Relation zur Gerätegröße in eine korrekte Entsorgungshandlung zu überführen.

Tabelle 82 Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften

Fragestellung	Hohes Involvement aller Zielgruppen: Einpersonenhaushalte Mehrpersonenhaushalte Kinder/Jugendliche/Schüler Senioren (60+) Kleine Gewerbetreibende
Basismotivation/ Grundproblem	Mein Gerät ist ausgefallen - wenn es nicht gänzlich defekt ist, wird es eher aufgehoben. Das Altgerät wird als Reserve genutzt. Alte Geräte können durchaus neben Neuen bestehen, außerdem wissen viele nicht, wie sie Daten (Festplatten) löschen oder transferieren können.
Wie hoch ist der „Schmerz“ bzw. die Motivation, zu reagieren	Grundsätzlich niedrig, es gibt Nutzungsalternativen, schnelle Ersatzbeschaffung jederzeit möglich. Je nach Verbraucher: Entweder: nicht überlebenswichtig. Oder: Mobiltelefon ist sehr wichtig wegen der ständigen Erreichbarkeit - Gerät, das immer bei einem ist und viele Funktionen erfüllt. Hierfür muss schneller Ersatz beschafft werden - bei diesem Gerät ist der Schmerz am höchsten. Die Schmerzhöhe bemisst sich daran, ob ich mit Hilfe des Geräts in Kommunikation mit anderen (Menschen oder Services) stehe. Kaum Entsorgungsdruck, da Geräte meist kaum Platz verbrauchen. Wenn Gerät noch funktionsfähig, wäre es „zu schade“, dies zu entsorgen. Aufbewahrung als Reserve. Korrekte Entsorgung auf Recyclinghof scheint in Relation zur Gerätegröße eine große Hürde darzustellen: „Für ein kaputtes Handy fahre ich doch nicht x km bis zum Recyclinghof.“
Wie gehe ich an die Lösung heran	Strategisch, planerisch für die meisten Geräte dieser Klasse, da ein baldiger Ausfall sich oft vorher ankündigt oder sowieso alle 2 Jahre ein neues Modell gekauft wird. Spontaner Ausfall (wie Handy oder Notebook, falls beruflich genutzt) ist jedoch ebenfalls möglich. Akzeptables Problem, da hohe Verfügbarkeit und geringes Problem bei der Neuanschaffung. Entsorgungsfrage aufgeschoben: Aufbewahren als Reserve, korrekter Entsorgungsweg unbekannt oder für aufwändig empfunden.

Fragestellung	Hohes Involvement aller Zielgruppen: Einpersonenhaushalte Mehrpersonenhaushalte Kinder/Jugendliche/Schüler Senioren (60+) Kleine Gewerbetreibende
Was macht das emotional mit mir	Es bereitet wenig Sorgen, sich damit beschäftigen zu müssen. Wenn Gerät noch in Ordnung ist, dann wird es zur Zweitverwertung aufbewahrt, „hat ja mal Geld gekostet“ (z. B. alter Farb-Drucker wird zum s/w-Kopierer). Erst wenn das Gerät kaputt ist, entsteht Bewusstsein für die Entsorgungsfrage. Entsorgung macht sich nach Größe aus (ein altes Handy wird eher weggeworfen als ein Mini-PC).
Wie ist das Informationsverhalten (aus der Problemstellung heraus)	Das Bewusstsein für unbedachtes Wegwerfen ist relativ hoch, hier denkt man am ehesten daran, dass Rohstoffe eingesetzt und verbaut wurden ("da steckt doch Intel inside drin“) und das evtl. noch private Daten auf dem Gerät gespeichert sind.
Welche Botschaften müssen wir vermitteln - Wie lautet das Mehrwert- bzw. Belohnungsversprechen bei Entsorgung	In Deinen EAG steckt was drin! Nicht ungenutzt wegschmeißen. Wir sorgen dafür, dass aus Deinen Geräten noch was rausgeholt wird! Bewusstsein dafür verstärken, dass diese EAG nicht in den Hausmüll gehören. Dass in diesen Geräten Rohstoffe drin stecken, ist emotional stärker verankert als bei Haushaltskleingeräten. Hier steckt Technologie drin, wir helfen Dir, Deine EAG fachgerecht zu entsorgen, damit hilfst Du der Umwelt. "Organspender"-Analogie für diese Geräteklasse (hat gute Dienste erwiesen, kann auch weiter gute Dienste erweisen unter dem Aspekt Umweltschutz, Ressourcenwiederverwertung)
Wie könnten die Kommunikationsmaßnahmen aussehen	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, "Hinterfragen des eigenen Handelns und Aufmerksamkeit des Handelns in Zukunft“. Unterstützung zum Finden einer komfortablen (korrekten) Entsorgungslösung. Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten unter dem Aspekt „gut finden“

Die Geräte der Unterhaltungselektronik werden von den Zielgruppen als „Geräte fürs emotionale Leben“ eingestuft. Diese Geräte werden häufig über die gesamte Lebensdauer bis zum Defekt genutzt. Es stellt sich die Herausforderung, den hohen Entsorgungsdruck aufgrund des Platzbedarfs schnell und korrekt zu lösen.

Tabelle 83 Geräte der Unterhaltungselektronik: Matching Geräte/Zielgruppen/Botschaften

Fragestellung	Einpersonenhaushalte - hohes Involvement	Mehrpersonenhaushalte - hohes Involvement	Kinder/Jugendliche/Schüler - hohes Involvement	Senioren (60+) - hohes Involvement	Kleine Gewerbebetriebe - hohes Involvement
Basismotivation/Grundproblem	Gerät kaputt oder funktioniert nicht mehr, wohin mit dem alten Gerät?	Gerät kaputt oder funktioniert nicht mehr, wohin mit dem alten Gerät?	Gerät kaputt oder funktioniert nicht mehr, wohin mit dem alten Gerät?	Gerät kaputt oder funktioniert nicht mehr, wohin mit dem alten Gerät?	Gerät kaputt oder funktioniert nicht mehr, wohin mit dem alten Gerät?
Wie hoch ist der „Schmerz“ bzw. die Motivation, zu reagieren	Niedrig, es gibt andere Ausweichmöglichkeiten (z. B. bei Ausfall TV-Gerät ausweichen auf PC oder Handy). Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Niedrig, es gibt meist andere Möglichkeiten auszuweichen. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Mittel, gibt zwar Ausweichmöglichkeiten, aber diese Geräteklasse begleitet und beeinflusst das Leben stark und prägt den Lifestyle. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Hoch, gibt oft keine Ersatzmöglichkeit und bedeutet schlimmstenfalls Isolation. Das TV-Gerät erscheint z. B. als überlebensnotwendig, ist das Rohr zur Welt, Ersatz für persönliche Ansprache. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.	Niedrig, da meist Ersatzmöglichkeiten vorhanden, die den eigentlichen Betrieb nicht massiv einschränken. Hoher Entsorgungsdruck, da oft wenig Platz.

Fragestellung	Einpersonenhaushalte - hohes Involvement	Mehrpersonenhaushalte - hohes Involvement	Kinder/Jugendliche/Schüler - hohes Involvement	Senioren (60+) - hohes Involvement	Kleine Gewerbebetriebe - hohes Involvement
Wie gehe ich an die Lösung heran	Strategisch, planerisch, s. Tabelle 81 oder Tabelle 82, je nach Größe	Strategisch, planerisch, prüfe Angebote, s.Tabelle 81 oder Tabelle 82, je nach Größe	Strategisch, planerisch, , s. Tabelle 81 oder Tabelle 82, je nach Größe	Spontan, reaktiv, , s. Tabelle 81 oder Tabelle 82, je nach Größe	Mittelfristig, planerisch, , s. Tabelle 81 oder Tabelle 82, je nach Größe
Was macht das emotional mit mir	bereitet wenig Sorgen, sich tiefergehend damit beschäftigen zu müssen. Bietet eher die Chance auf Erneuerung oder Optimierung, wobei diese Geräte angenehmer Lebensbegleiter sind.	bereitet keine großen Sorgen, sich tiefergehend damit beschäftigen zu müssen; bietet eher die Chance auf Erneuerung oder Optimierung (bestenfalls beschäftigt sich die Familie mit sich selbst).	Bereitet Herausforderung, sich mit den neuesten Trends auseinanderzusetzen, bietet die Chance auf Erneuerung oder Optimierung. Altes Gerät verbraucht ggf. viel Platz und muss raus.	ängstlich, überfordert, hilfesuchend, will schnellstmöglich Ersatzgerät. Altes Gerät verbraucht ggf. viel Platz und muss raus, ist aber schwer.	bereitet keine großen Sorgen, sich tiefergehend damit beschäftigen zu müssen, bietet eher die Chance auf Erneuerung oder Optimierung, muss aber zeit- und kosteneffizient sein

Fragestellung	Einpersonenhaushalte - hohes Involvement	Mehrpersonenhaushalte - hohes Involvement	Kinder/Jugendliche/Schüler - hohes Involvement	Senioren (60+) - hohes Involvement	Kleine Gewerbebetriebe - hohes Involvement
Wie ist das Informationsverhalten (aus der Problemstellung heraus	Prüfe Angebote (Angebotsfülle), tausche mich mit Freunden und Familie aus, gehe ins Internet oder auch Fachhandel. (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage). Je größer das Gerät, desto eher die Frage nach Entsorgung.	Prüfe Angebote (Kostengetrieben), tausche mich mit Freunden und Familie aus, gehe ins Internet oder auch Fach-handel (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage). Je größer das Gerät, desto eher die Frage nach Entsorgung.	Prüfe Angebote (Qualität, Kosten, Hippness), tausche mich mit Freunden aus, surfe im Internet, evtl. sogar Fachmessenbesuch, oft Fachhandel (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage). Je größer das Gerät, desto eher die Frage nach Entsorgung.	Frage Kinder/Enkel, die sich dann dem Problem annehmen oder telefoniere mit dem Fachhandel (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage).	Wird von Assistentin/Sekretärin geregelt, recherchiert im Internet, macht Vorschläge. (Ersatzanschaffung und Entsorgungsfrage).

Fragestellung	Einpersonenhaushalte - hohes Involvement	Mehrpersonenhaushalte - hohes Involvement	Kinder/Jugendliche/Schüler - hohes Involvement	Senioren (60+) - hohes Involvement	Kleine Gewerbebetriebe - hohes Involvement
Welche Botschaften müssen wir vermitteln - Wie lautet das Mehrwert- bzw. Belohnungsversprechen bei Entsorgung	Wir helfen Dir, Deine EAG schnell, sicher, umweltschonend fachgerecht zu entsorgen	Von uns bekommst Du die bestmöglichen Infos, damit Du Dein EAG zu dem von Dir benötigten Zeitpunkt schnell, sicher, umweltschonend, fachgerecht entsorgen kannst.	Von uns bekommst Du die bestmöglichen Infos, damit Du Dein EAG zu dem von Dir benötigten Zeitpunkt schnell, sicher, umwelt-schonend, fachgerecht entsorgen kannst.	Wir helfen Dir, die sicherste und schnellste Lösung zu finden um Dein EAG umweltschonend und fachgerecht zu entsorgen	Wir helfen Dir, problemlos, umweltgerecht, kosteneffizient, schnell, sicher und umweltschonend Dein EAG zu entsorgen
Wie könnten die Kommunikationsmaßnahmen aussehen	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, Infos zu Ressourcen "was steckt da alles drin - was lässt sich damit machen“.	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, Infos zu Ressourcen "was steckt da alles drin - was lässt sich damit machen“.	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, Infos zu Ressourcen "was steckt da alles drin - was lässt sich damit machen“.	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, Infos zu Ressourcen "was steckt da alles drin - was lässt sich damit machen“. Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden	Aufklärung & Information: Online-Plattform mit Content Marketing, Infos zu Ressourcen "was steckt da alles drin - was lässt sich damit machen“. Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden

Fragestellung	Einpersonenhaushalte - hohes Involvement	Mehrpersonenhaushalte - hohes Involvement	Kinder/Jugendliche/Schüler - hohes Involvement	Senioren (60+) - hohes Involvement	Kleine Gewerbebetriebe - hohes Involvement
	Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden. Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten.	Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden. Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten.	Handel & Hersteller: via Info/Portal - muss Platz zum Abgeben beim Handel geschaffen werden Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten.	Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten.	Image: Kampagne mit Flyer, Hauswurfsendung, Anzeigen, PR/bezahlte PR in redaktionellem Umfeld, Plakaten.

4.7.4 Touchpoints

Ergänzend zum Zielgruppen-Vergleich wurde eine erste Sammlung von relevanten Touchpoints (Kommunikationskontaktpunkte mit der Zielgruppe) festgehalten. Dies dient der späteren Aussteuerung der Kampagne in Maßnahmen und Botschaften an den Punkten, an denen die Zielgruppe in Berührung mit dem Thema kommt oder kommen kann. (Schüller 2012).

Festgehalten wurden folgende erste Touchpoints:

- Digital:
  Homepage UBA/BMUB
  Facebook
  Social Media
  Twitter
  SEO/SEM

- Offline:
  Kampagne
  PR
  Plakate
- Magazin/nach ZG
  City Cards
  Anzeigen
  Flyer
  Abfallkalender
- Face to Face:
  Vor Ort/Handel
  Vor Ort/Sammelstellen
  Events
  Aktionen nach ZG
  Kooperationen/Medienkoops
  Promotions
  Botschafter/Schirmherr
  Infomobil/Abfallmobil

4.7.5 Kommunikationskonzept

4.7.5.1 Strategische Botschaft

Um die Kommunikationsbotschaft mit der Handlungsaufforderung, Elektroaltgeräte richtig zu entsorgen, vermitteln zu können, wurde bei der Entwicklung der kreativen Ansätze die emotionale Grundhaltung (Einstellung: Motivation in Bezug zum Thema, siehe Tabelle 80 bis Tabelle 83) der Zielgruppen in den Vordergrund gestellt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse ist hier der größte Hebel zu vermuten.

Auf dieser Grundlage wurde ein erstes Ideenpapier mit der folgenden strategischen Botschaft vorgestellt:

„Trennen ist nicht leicht. Richtig recyceln schon."

Diese strategische Botschaft wurde dann in eine emotionale Kommunikationsbotschaft überführt:

„Deutschland trennt sich".

Dabei wird Deutschland (Deutschland als Metapher für „gemeinsam" und „alle" Zielgruppen) aufgefordert, sich von defekten Elektroaltgeräten zu trennen.

Dabei ging es besonders darum, einen emotionalen Spannungsbogen aufzubauen und möglichst viele Menschen in das Thema zu involvieren, was für viele nicht unbedingt vorrangige Relevanz hat. Grundsätzlich ist Trennen nicht immer einfach. Wenn man sich aber erstmal getrennt hat, wirkt es befreiend. Vor allem, wenn es alle machen, wirkt es ansteckend – da kann man sich kaum dagegen stellen. Das implizierte Belohnungsversprechen ist der "Neuanfang" mit dem Zusatznutzen, das Richtige getan zu haben, ergo richtig entsorgt zu haben.

Aus diesem Grund wirkt: „Deutschland trennt sich" mehrdimensional:

- Aufforderungscharakter,

- Mitmachcharakter,
- Die richtige Entsorgung,
- Sein Gewissen erleichtern.

Es wurde ein Prototyp für eine grafische Übersetzung des Aktionsmottos “Deutschland trennt sich” entwickelt, siehe Abbildung 49:

Abbildung 49: Prototyp für eine grafische Übersetzung des Aktionsmottos “Deutschland trennt sich“, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und Copyright Heymann Brandt de Gelmini 2014

4.7.6 Mustermotive

Die Kreativabteilung der Agentur hat auf dieser Basis unterschiedliche Mustermotive entwickelt, die ausschließlich zur Visualisierung der Botschaft „Deutschland trennt sich“ designt wurden (aber in keinem Fall reale Motive sind, sondern erste Prototypen darstellen):

- Mustermotiv „Föhn“ (Abbildung 226)
- Mustermotiv „Monitor“ (Abbildung 227)
- Mustermotiv „Telefon“ (Abbildung 228)
- Mustermotiv „Toaster“ (Abbildung 229)
- Mustermotiv „Fernseher“ (Abbildung 230)
- Mustermotiv „Wäschetrockner“ (Abbildung 231)
- Mustermotiv „Lampe“ (Abbildung 232)

Die Mustermotive sind im Anhang Kapitel 10.8 abgebildet.

Für die Realisierung einer Kampagne würden auf Basis der Mustermotive Geräte in ausgewählten Wohnumfeldern fotografiert.

Die kreative Dramaturgie der Botschaft wurde jeweils im Haushalt bzw. wohnlichen Umfeld verortet. Man sieht einen Fleck oder Umrisskontur an der Wand, wo ein ehemals funktionierendes Elektrogerät eine Lücke hinterlässt, weil es nicht mehr vorhanden ist (da es ordentlich entsorgt wurde). Aufgelöst wird die Szenerie durch Headlines, die im Wortspiel auf ein intensives menschliches Beziehungsmiteinander schließen lassen. Dabei geht es tatsächlich aber immer um einen konkreten Grund, warum ein altes, defektes Elektrogerät entsorgt werden musste.

4.7.7 Charakterisierung und Bewertung des Kampagnenansatzes

Im Ergebnis ist ein Kampagnenansatz entstanden, der allen Anforderungen und Zielsetzungen gerecht wird:

- Es werden unterschiedliche Geräte aus verschiedenen Gerätegruppen in den Motiven verwendet.
- Pro Motiv wird ein bestimmtes Gerät kommuniziert.
- Das Konzept lässt sich auf fast jede Geräteklasse adaptieren.
- Die Art und Weise der Ansprache hat Witz und transportiert Emotionen und bindet somit einen breiten Zielgruppenkreis.
- Auf eine Ermahnung oder „Zeigefinger-Botschaften“ wird verzichtet, stattdessen werden einfache, wenige Botschaften kommuniziert.

Außerdem wirkt die Kampagne mehrdimensional, siehe Aufzählung in Abschnitt 4.7.5.1.

Die Anforderungen und Zielsetzungen werden durch folgende Gestaltungselemente erreicht:

Durch frische Farben und eine ungewöhnliche Schriftart in Kombination mit dem eigenständigen Kampagnenlogo „Deutschland trennt sich“, wird der Eindruck vermittelt, es handele sich um eine moderne Lifestyle-Kampagne einer Partnervermittlung.
Erst beim zweiten Hinsehen wird bewusst, dass der Absender das BMUB/UBA ist und die Aufforderung zur Trennung sich auf Recycling defekter Elektroaltgeräte bezieht.
Das ist der „kreative Bruch“.
Dadurch wird eine emotionale Klammer als verbindendes Element zwischen eigentlichem „Recycling“-Ziel und der „Trennungs“-Botschaft geschaffen.

Die Grundbotschaft und Story pro Motiv lassen sich je nach Zielgruppe durch das Setting (Wohnambiente von klassisch elegant bis trendy modern) und die Geräte (von Telefon bis Trockner) aussteuern.
Dadurch lässt sich die Anforderung an das definierte Zielgruppen- und Gerätespektrum erfüllen

Jedes Motiv enthält neben erklärendem Copytext einen call to action und Hinweis auf weitere Informationen im Web.

Dadurch lässt sich die Anforderung an weiterführende, leicht zugängliche Informationsbeschaffung erfüllen.

Insgesamt besteht der Kampagnenansatz aus folgenden Elementen:

- Es wurde eine strategische Botschaft/ ein Aktionsmotto „Deutschland trennt sich“ mit Prototyp für die grafische Umsetzung als Claim mit Logo entwickelt, siehe Abschnitt 4.7.5.1 und 4.7.6.
- Es wurden sieben Motive als Prototypen entwickelt, die sowohl im Hoch- als auch Querformat umsetzbar sind, siehe Anhang Abbildung 226 bis Abbildung 232.
- Es wurde ein eigenständiges Kampagnendesign in Wort- und Bildsprache entwickelt.

4.7.8 Ausblick auf die nächsten Schritte

Die präsentierten Kampagnenideen befinden sich alle noch im Layoutstadium. Um die Kampagne einer großen Öffentlichkeit zuzuführen, bedarf es der konkreten Realisierung mit folgenden nächsten Schritten:

Festlegung des gewünschten Maßnahmen- und Budgetrahmens durch den Auftraggeber.

Umsetzung und Produktion der Kampagne und Festlegung von finalen Geräten und Wohnambiente je nach Zielgruppe durch den Auftraggeber inkl. Feinschliff wie Lookentwicklung, Postproduction und Erstellung von Mastern.

Adaption auf die entsprechenden Maßnahmen, anschließende Umsetzung und Produktion

Alle präsentierten Motive sind zunächst Composings und grafische Scribbles als Prototypen, d. h. es wurden derzeit noch keine Geräte oder Wohnumfelder fotografiert. Die für eine Realisierung notwendigen Schritte wurden dem UBA kommuniziert und budgetiert.

Die Nutzungsrechte an allen Ideen sind im Besitz der Agentur.

Alle Motive lassen sich in weiterführenden Kommunikationsmaßnahmen wie Anzeigen, Plakate, Flyer, Imagespots umsetzen.

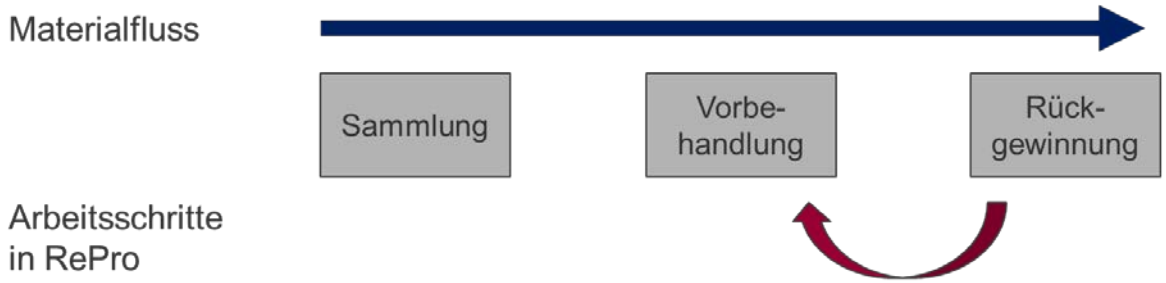
5 Rückgewinnung von RePro-Metallen

5.1 Gegenstand und Vorgehen

Gegenstand dieses Kapitels ist die Analyse der Rückgewinnungstechnik der RePro-Metalle sowie – unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Analyse von Vorbehandlungsverfahren – die Ableitung von Behandlungsanforderungen für RePro-Produkte.

Vor dem Ziel des Gesamtprojektes zur Optimierung der Entsorgung von EAG (siehe Kapitel 1) wurde ein Vorgehen gewählt, bei dem zunächst untersucht wurde, welche Rückgewinnungsverfahren für welche RePro-Metalle in welchem Entwicklungsstadium verfügbar sind und welche Anforderungen diese Verfahren an den Input stellen. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die Vorbehandlung von EAG (siehe auch Abbildung 50).

Abbildung 50: Methodisches Vorgehen im Projekt RePro bei den Arbeitspaketen Rückgewinnung und Vorbehandlung



Quelle: eigene Darstellung

Daher wird in diesem Bericht zunächst auf die Rückgewinnungsverfahren eingegangen, bevor die Vorbehandlung von EAG thematisiert wird.

5.2 Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle

Die dominierende Route zur Rückgewinnung von RePro-Metallen im großtechnischen Maßstab ist in der ersten Stufe der Verfahrenskette die Pyrometallurgie. Zu den Verfahren der Rückgewinnung, dem Status quo der Implementierung sowie den Quellen der Informationen siehe Anhang Kapitel 10.7 Die folgende Abbildung 51 zeigt den Stand der Verfügbarkeit von Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle im Überblick.

Abbildung 51: Übersicht Rückgewinnungsverfahren für RePro-Metalle



Quelle: eigene Darstellung

- Für Edelmetalle(inkl. PGM) und Sn erfolgt die Rückgewinnung überwiegende in integrierten Kupferhütten (mit anschließender Hydrometallurgie). Geeignete Vorstoffe im Projektkontext sind vor allem Leiterplatten und vorbehandelte EAG, in denen Edelmetalle aufkonzentriert und Störstoffe separiert wurden.
- Co wird großtechnisch in Bleihütten aus Batterien zurückgewonnen.
- Ta wird in der Ta-Hütte aus geeigneten Fraktionen zurückgewonnen, die einen (je nach Inputfraktion unterschiedlichen) Mindestgehalt von Ta enthalten müssen.
- Sb kann in integrierten Kupferhütten als Antimonverbindung ebenfalls großtechnisch zurückgewonnen werden.
- Die Rückgewinnung von In ist nur für Produktionsabfälle großtechnisch etabliert (Hydrometallurgie nach Pyrometallurgie).
- Eine Rückgewinnung von Be aus der Verwendung als Legierungselement (z. B. bei Kupfer) ist nicht etabliert.
- Ga wird derzeit nicht aus den RePro-relevanten Fraktionen großtechnisch zurückgewonnen.
- Für die großtechnische Rückgewinnung von Seltenen Erden in Form von Leuchtstoffen stehen die Verfahren in der Großtechnik zur Verfügung.
- Für die Rückgewinnung anderer Seltenen Erden werden hydrometallurgische Verfahren angewendet. Es besteht eine Vielfalt an Verfahren und Möglichkeiten. Allerdings setzen ökonomische Ansprüche sowie das Vorhandensein von Störstoffe in der Praxis Grenzen. Die Effizienz der Verfahren könnte sich mit steigender Konzentration der Zielelemente in den Inputstoffen erhöhen. Informationen zu konkreten Schwellenwerten für aktuelle Mindestgehalte lagen nicht vor. Teilweise reagieren die Effizienzen hydrometallurgischer Verfahren auch auf das Verhältnis der Konzentrationen von Zielmetallen zueinander (Beispiel: bei der Rückgewinnung von SE-Magnetrohstoffen ist das Verhältnis von Nd zu Dy ein entscheidender Faktor für die Konfiguration des Verfahrens). In der Konsequenz

können solche Verfahren ggf. enge Toleranzen bei den Schwankungen der Zusammensetzung von Inputstoffen setzen. Bisher wird die Rückgewinnung von Nd mittels Hydrometallurgie aus Magneten im Pilotmaßstab bzw. als Entwicklungslinie in der Großtechnik betrieben.

5.3 Rückgewinnungskonflikte

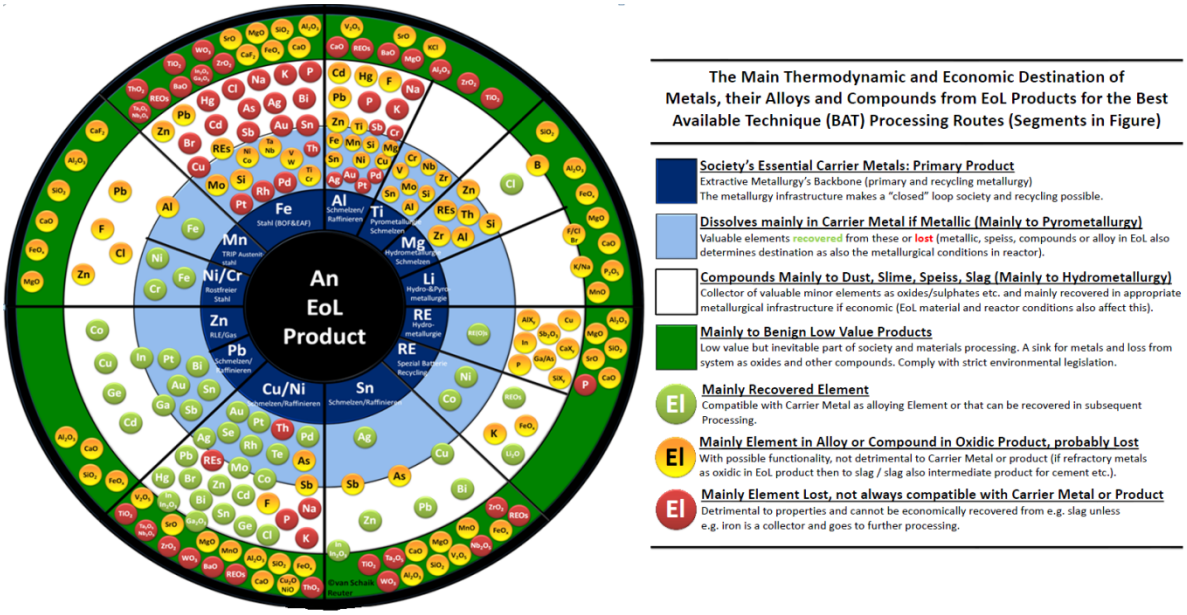
Eine anschauliche Darstellung der Rückgewinnungsrouten erfolgte von van Schaik und Reuter (2013). Das „Metal Wheel“ des Recyclings (siehe Abbildung 52) geht von den sogenannten Trägermetallen im Zentrum aus. In den Rückgewinnungsrouten dieser Trägermetalle können einige andere Metalle ebenfalls zurückgewonnen werden, andere hingehen werden in Outputströmen oder Formen ausgetragen, die eine Rückgewinnung (derzeit) nicht ermöglichen (z. B. oxidiert in der Schlacke). Die farblich gekennzeichneten Ringe (von innen nach außen: hellblau, weiß und grün) geben zudem Auskunft über das Zielmedium der neben dem Trägermetall enthaltenen Metalle. Der hellblaue Ring kennzeichnet Metalle, die sich im Trägermetall lösen, der weiße Ring kennzeichnet Metalle, die in Schlacke, Stäube oder Schlämme übergehen. Der grüne Ring bezeichnet die Austragspfade, in denen die betrachteten Metalle niedrigwertig vorliegen, sodass eine Rückgewinnung nicht erfolgt. Das Zielmedium alleine sagt noch nichts über die Rückgewinnbarkeit, die technologieabhängig ist, der Metalle aus.

So können in der Bleiroute Germanium und Kupfer aus der Schlacke zurückgewonnen werden, während Seltene Erden, die in der Kupferroute verschlackt werden, derzeit als verloren betrachtet werden müssen.

Metalle und Verbindungen, die in der jeweiligen Prozessroute rentabel zurückgewonnen werden können, sind im Metal Wheel grün dargestellt. So können beispielsweise Edelmetalle wie Gold, Platin, Palladium oder Silber in der Kupferroute zurückgewonnen werden. Dasselbe gilt für Gallium oder Indium in der Blei- und Zinkroute, Indium in der Zinnroute. Seltene Erden können nur in speziell auf die SE Rückgewinnung ausgerichteten Prozessrouten zurückgewonnen werden.

Metalle, die in der jeweiligen Route nicht zurückgewonnen werden können, sind gelb bzw. rot gekennzeichnet. Die rot gekennzeichneten Metalle haben zudem negative Auswirkungen auf die Eigenschaften des Trägermetalls.

Abbildung 52: Metal Wheel: Hauptprozessor der Pyro- und Hydrometallurgie



Quelle: van Schaik und Reuter (2013)

Auf der Grundlage der aktuell großtechnisch verfügbaren Rückgewinnungsverfahren sowie der Rückgewinnungskonflikte in den Verfahren ergeben sich Notwendigkeiten, spezifische RePro-Metalle abzutrennen, bevor die Fraktionen den Rückgewinnungsverfahren zugeführt werden. Einen Überblick gibt die Tabelle 84. Dabei wird auch berücksichtigt, ob derzeit großtechnische Rückgewinnungsverfahren für die jeweiligen RePro-Metalle etabliert sind.

Tabelle 84: Überblick über Separationsmöglichkeiten für RePro-Metalle

Komponente der RePro-Produkte	RePro-Metalle	Großtechnisch verfügbare Rückgewinnungsroute für RePro-Komponenten oder Fraktionen	RePro-Metalle, bei denen eine Rückgewinnung aufgrund von Rückgewinnungskonflikten in der genannten Route in der Regel nicht erfolgt
Leiterplatten, leitende Verbindungen	Au, Ag, Pd, Ga, Sn, Ta, Sb, Be	Integrierte Cu-Hütte	Co, Ga, Ta, Be, SE
Akkumulatoren	Co	integrierte Pb-Hütte	SE
Ga-Komponenten aus Prozessoren, LED	Au, Ga, Ag, Sb, Sn	integrierte Pb-Hütte	Ta, Be
Bildschirme	In	nicht etabliert	

Komponente der RePro-Produkte	RePro-Metalle	Großtechnisch verfügbare Rückgewinnungsroute für RePro-Komponenten oder Fraktionen	RePro-Metalle, bei denen eine Rückgewinnung aufgrund von Rückgewinnungskonflikten in der genannten Route in der Regel nicht erfolgt
Magnete	Nd	Hydrometallurgie; nicht etabliert, technisch aber vor dem upscaling	
CRT, LCD, LED	Y	Hydrometallurgie zwar technisch realisierbar jedoch großtechnisch nicht etabliert	
Kondensatoren	Ta	Ta-Hütte	Ag,
Kunststoffe (Flammschutz)	Sb	für Leiterplatten: Integrierte Cu-Hütte für Gehäusekunststoffe: nicht etabliert	
Kupferkontakte	Be	nicht etabliert	

5.4 Ableitung von Behandlungsempfehlungen

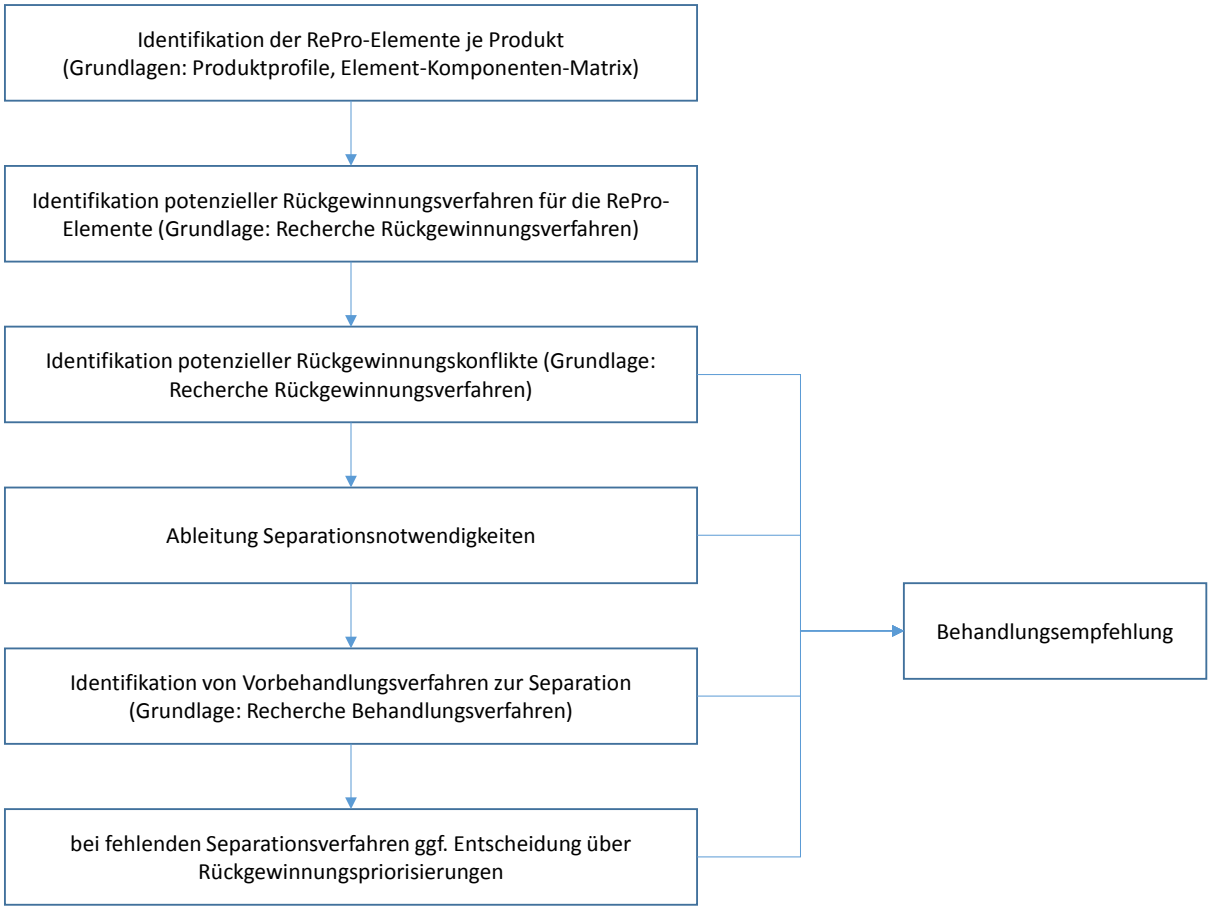
In diesem Kapitel werden aufbauend auf den Informationen zum Vorkommen von RePro-Metallen in den RePro-Produkten und den Darstellungen zur Verfügbarkeit von Vorbehandlungs- und Rückgewinnungstechniken Behandlungsempfehlungen abgeleitet. Dabei werden Schadstoffaspekte, die Behandlungsanforderungen des ElektroG bzw. ElektroG-2 sowie die Kombination von Elementen in den Komponenten berücksichtigt. Die Vorgehensweise ist schematisch in der Abbildung 53 dargestellt.

Die Behandlungsempfehlungen wurden vor dem Hintergrund der Annahmen formuliert, dass

- eine BehandlungsVO auf der Basis des § 24 ElektroG-2 erlassen wird und
- ein Revisionszyklus von 5 Jahren beabsichtigt ist.

Der zeitliche Aspekt ist vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklung in der Zusammensetzung der Geräte und der Verfügbarkeit von Rückgewinnungs- und Vorbehandlungsverfahren von Bedeutung.

Abbildung 53: Vorgehen zur Ableitung von Behandlungsempfehlungen

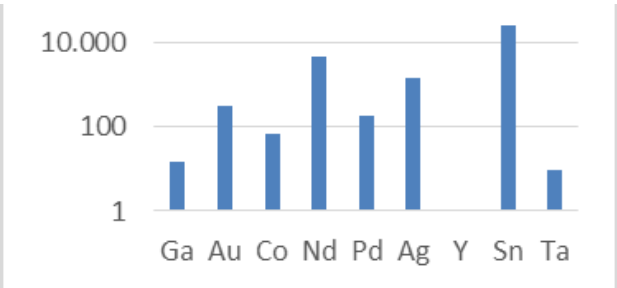


Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 54 bis Abbildung 84 veranschaulichen die Massen an RePro-Metallen in den einzelnen RePro-Produkten. Dargestellt werden die arithmetischen Mittelwerte der Literaturwerte[60].

5.4.1 PC (RePro Produktgruppe 3.1)

Abbildung 54: Produktprofil PC (Angaben in mg/Produkt)



[60] Dabei wurden unplausible Extremwerte entsprechend den in Kapitel 3 dieses Berichtes gemachten Experteneinschätzungen nicht berücksichtigt.

Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Au, Ag, Pd, Ta sowie Sn befinden sich in den Leiterplatten. Ga wird überwiegend in integrierten Schaltkreisen verwendet, in denen auch Au enthalten ist. Separationstechniken auf der Vorbehandlungsstufe sind nicht etabliert, wodurch es zu einem Rückgewinnungskonflikt in der integrierten Cu-Hütte kommt. Mengen- und Umweltrelevanz sprechen für die Rückgewinnung der Edelmetalle und PGM.

Nd wird vor allem in Festplattenmagneten genutzt. Diese müssten in der Vorbehandlung separiert werden, um einen Verlust in den etablierten Verwertungspfaden zu vermeiden. Hierzu ist die manuelle Separation etabliert, die mechanische Separation befindet sich im Pilotmaßstab. Großtechnische Rückgewinnungsverfahren sind nicht etabliert.

Ta wird mengenrelevant in Kondensatoren auf Leiterplatten genutzt. Die Separation in der Vorbehandlung ist großtechnisch nicht etabliert. Versuche zur mechanischen Separation in Kapitel 6.6.3verdeutlichen das Risiko des Verlustes von Edelmetallen bzw. PGM durch die mechanische Separation von Ta-Kondensatoren. Es besteht ein Rückgewinnungskonflikt zwischen Tantal und PGM sowie Edelmetallen. Mengen- und Umweltrelevanz priorisieren derzeit die Rückgewinnung der Edelmetalle und PGM.

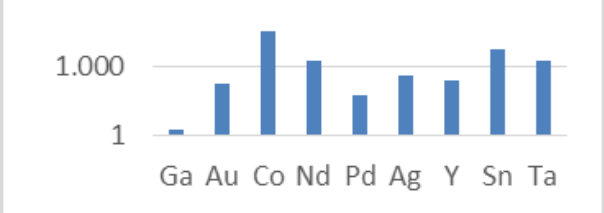
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Aus Gehäusekunststoffen ist keine Rückgewinnung großtechnisch etabliert.

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Separation der Leiter- und Festplatte und Zuführung der Leiterplatten in die Rückgewinnung gemäß Kupferroute,
- Separation der Nd-Magnete aus den Festplatten.

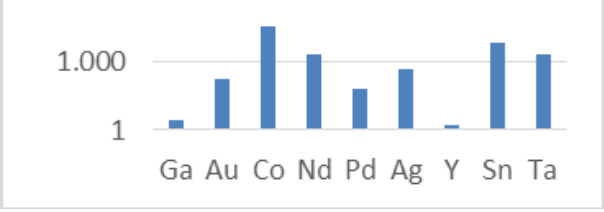
5.4.2 Laptops (RePro Produktgruppe 3.2), Tablet (RePro Produktgruppe 3.3)

Abbildung 55: Produktprofil Laptop mit CCFL (Angaben in mg/Produkt)



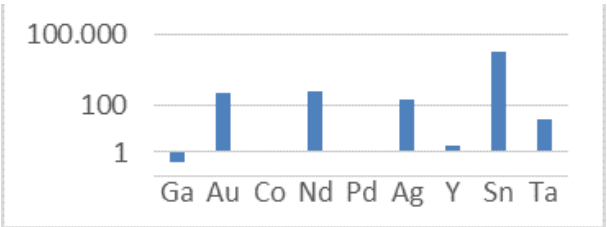
Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 56: Produktprofil Laptop mit LED (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 57: Produktprofil Tablet (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Laptops und Tablets müssen aufgrund der Schadstoffe in Bildschirmen (im Falle von CCFL) und Akkumulatoren einer Entfrachtung entsprechend ElektroG Anhang 3 bzw. Anlage 4 ElektroG-2 zugeführt werden. Die separierten Akkumulatoren können als kobaltreiche Fraktion betrachtet werden, in der die Hauptmengen des Co lokalisiert sind. Zur Rückgewinnung stehen spezifische Verwertungswege zur Verfügung.

Au, Ag, Pd, Ta sowie Sn befinden sich in den Leiterplatten.

Ga wird überwiegend in integrierten Schaltkreisen verwendet, in denen auch Au enthalten ist. Separationstechniken auf der Vorbehandlungsstufe sind nicht etabliert, wodurch es zum Rückgewinnungskonflikt in der integrierten Cu-Hütte kommt. Mengen- und Umweltrelevanz priorisieren hier die Rückgewinnung der Edelmetalle und PGM.

Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Nd wird vor allem in Festplattenmagneten genutzt. Diese müssten in der Vorbehandlung separiert werden, um einen Verlust in den etablierten Verwertungspfaden der Massenmetalle (z. B. Aluminium) zu vermeiden. Bei Festplatten von Laptops und Tablets, die bis zum Jahr 2020 in die Entsorgung gelangen, handelt es sich zum sehr weit überwiegenden Teil um mechanische Festplatten. Diese sind deutlich kleiner als bei PC und weisen daher bezüglich einer Separation ein schlechteres Aufwand-Nutzen-Verhältnis auf.

Zur Ta-Rückgewinnung siehe Ausführungen in Kapitel 5.4.1 oben.

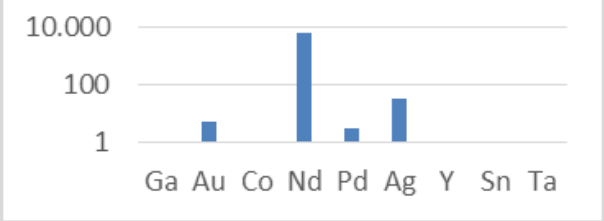
Die Rückgewinnung von In und Leuchtstoffen aus Flachbildschirmen ist derzeit nicht etabliert.

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Manuelle Separation des Akkumulators und Zuführung in die Batterieverwertung mit Rückgewinnung von Co
- Separation von CCFL-Bildschirmen bzw. –Komponenten zum Zweck der Schadstoffentfrachtung
- Separation der Leiterplatten und Zuführung in die Rückgewinnung von Edelmetallen und PGM

5.4.3 Festplatten Extern (RePro Produktgruppe 3.4)

Abbildung 58: Produktprofil Festplatten Extern (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Au, Ag und Pd sind in der Leiterplatte enthalten. Die Separation der Leiterplatte von dem Gehäuse über manuelle Verfahren ist etabliert, die mechanische Separation führt potenziell durch die Zerstörung der Leiterplatte und ggf. auch der integrierten Schaltkreise zu Verlusten von Au und Ag.

Nd ist in den Steuermagneten des Linear- sowie des Spindelmotors enthalten. Die Separation des Nd-Magnets von den anderen Bauteilen ist als manuelle Separation in Großversuchen bestätigt, die mechanische Separation befindet sich im Pilotmaßstab. Großtechnische Rückgewinnungsverfahren für Nd sind nicht etabliert.

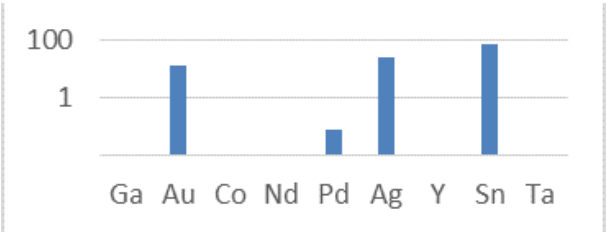
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschläge für die Vorbehandlung

- manuelle Separation der Leiterplatte und Zuführung in die Rückgewinnung von Edelmetallen und PGM
- Separation der Nd-Magnete aus den Festplatten

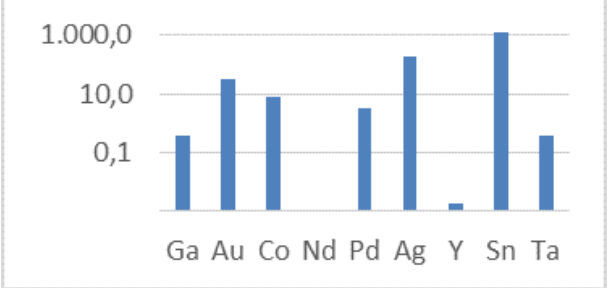
5.4.4 USB Sticks (RePro Produktgruppe 3.5), MP3 Player (RePro Produktgruppe 3.21)

Abbildung 59: Produktprofil USB Sticks (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 60: Produktprofil MP3 Player (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Au, Ag und Pd sind in der Leiterplatte enthalten. Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Einige MP3 Player enthalten einen kleinen Bildschirm. Eine Rückgewinnung von In und Leuchtstoffen aus derartigen Flachbildschirmen ist derzeit nicht etabliert.

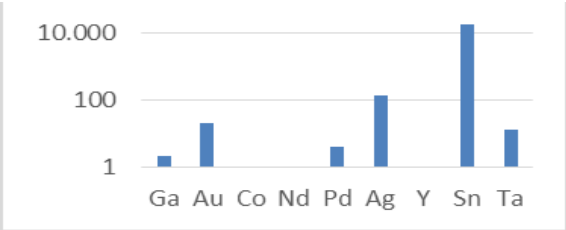
Vorschlag für eine Vorbehandlung:

Aufgrund der geringen Gerätegröße ist die spezifische Menge an RePro-Metallen pro Produkt zwar gering, doch die hohe Anzahl der USB Sticks führt zu hohen Frachten. Eine spezifische Behandlung ist angesichts der kleinteiligen Sortierung weder technisch möglich noch wirtschaftlich.

Eine Zuführung der USB Sticks ohne weitere Vorbehandlung in die integrierte Kupferhütte erscheint sinnvoll, sofern eine Separation aus der entsprechenden Sammelgruppe möglich ist.

5.4.5 Beamer (RePro Produktgruppe 3.6)

Abbildung 61: Produktprofil Beamer (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Au, Ag, Pd, Ta sowie Sn befinden sich in den Leiterplatten. Zur Verwendung und Separation von Ta siehe Kapitel 5.4.1.

Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

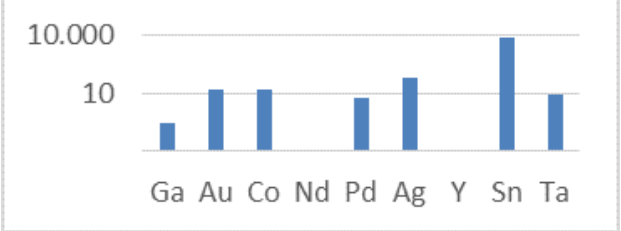
Aufgrund von quecksilberhaltigen Lampen muss eine separate Behandlung vor der mechanischen Zerlegung erfolgen (Entfrachtung entsprechend ElektroG Anhang 3 bzw. Anlage 4 ElektroG-2).

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Separation der Hg-haltigen Lampe (soweit vorhanden),
- Separation der Leiterplatten (ggf. nach Grobaufschluss) und Zuführung zur Edelmetall- und PGM-Rückgewinnung.

5.4.6 Multifunktionsdrucker (RePro Produktgruppe 3.7)

Abbildung 62: Produktprofil Multifunktionsdrucker (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Multifunktionsdrucker müssen entsprechend Anhang III ElektroG bzw. Anlage 4 ElektroG-2 schadstoffentfrachtet werden.

Au, Ag, Pd, Ta sowie Sn sind vorwiegend in den Leiterplatten enthalten.

Die manuelle Separation der Leiterplatten zur Rückgewinnung von Au, Ag, Pd und Sn ist problematisch, da diese Leiterplatten fest verbaut sind und oftmals nur mit hohem Aufwand manuell entnommen werden können.

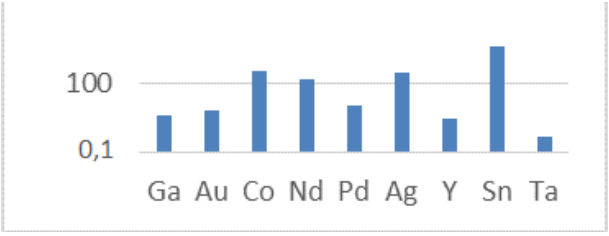
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich, die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen hingegen nicht.

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Separation der Tonerkartuschen, soweit vorhanden,
- Separation der Leiterplatten ggf. nach einem Grobaufschluss, Die separierten Leiterplatten sollten der Edelmetall- und PGM-Rückgewinnung zugeführt werden.

5.4.7 Schnurlose Telefone (RePro Produktgruppe 3.8)

Abbildung 63: Produktprofil Telefone (schnurlos) (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Schnurlostelefone müssen entsprechend Anhang III ElektroG bzw. Anlage 4 ElektroG-2-E entfrachtet werden. Über die Separation der Akkumulatoren wird die wesentliche Menge Co in eine spezifische Fraktion überführt.

Die wesentlichen Anteile Nd sind in Telefonen in den Magneten der Lautsprecher lokalisiert. Ein Nd-haltiger Vibrationsalarm ist als Ausstattungsmerkmal selten. Die Separierung der kleinen Nd-Magnete aus den Lautsprechern ist zeitlich aufgrund der geschlossenen Bauweise sehr aufwendig.

Die Leiterplatten der Telefone enthalten die wesentlichen Anteile von Au, Pd, Ag und Ga. Sie haben in der Regel eine geringere Wertigkeit, als z. B. Leiterplatten aus Smartphones.

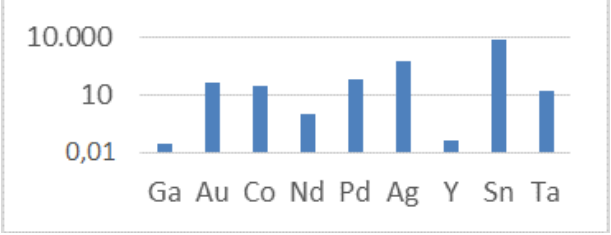
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Separierung der Akkumulatoren,
- Zuführung der separierten Akkumulatoren in die Batterieverwertung mit Rückgewinnung von Co
- Zuführung der Leiterplatten ggf. nach mechanischem Grobaufschluss des Telefons zur Edelmetall- und PGM-Rückgewinnung.

5.4.8 Navigationsgeräte (RePro Produktgruppe 3.9)

Abbildung 64: Produktprofil Navigationsgeräte (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Navigationsgeräte, die als Altgeräte in die Entsorgung gelangen, könnten CCFL-Hintergrundbeleuchtungen enthalten. Eine Kennzeichnung ist nicht vorhanden. Mobile Navigationsgeräte enthalten einen Akkumulator, der eine deutlich höhere Kapazität aufweist, als die Pufferakkumulatoren fest eingebauter Geräte. Aufgrund der Entfrachtungsanforderungen des Anhangs 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 muss eine Separation der Hintergrundbeleuchtung und des Akkumulators erfolgen.

Die Leiterplatten enthalten die wesentlichen Anteile von Ga, Au, Pd und Ag. Co befindet sich in der Batterie. Ga kann in der LED-Hintergrundbeleuchtung vorhanden sein.

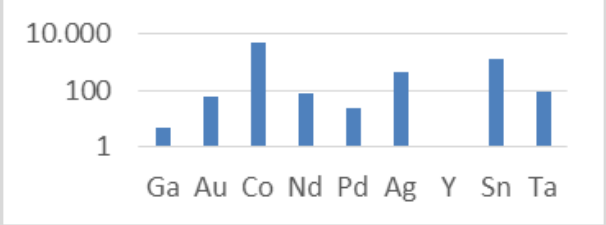
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg etabliert.

Vorschläge für eine Vorbehandlung:

- Da keine Kennzeichnung der Geräte über die Verwendung von Hg vorhanden ist, muss eine entsprechende Prüfung sämtlicher Navigationsgeräte erfolgen. Dies kann während der Entnahme der Akkumulatoren geschehen.
- Eine Separation der Leiterplatten im Rahmen des LCD-Ausbaus ist mit geringem Zusatzaufwand in der Regel möglich. Da bei Navigationsgeräten in der Regel keine PMMA-Frontplatte genutzt wird, ist im Unterschied zu Flachbildschirm-Monitoren oder -Fernsehern hierüber kein zusätzlicher Kostendeckungsbeitrag möglich. Alternativ kommt auch eine Separation der Leiterplatten nach einem mechanischen Grobaufschluss des Restgehäuses in Frage.
- Die Leiterplatten sollten einer Rückgewinnung der Edelmetalle und PGM zugeführt werden.
- Hinsichtlich der Recyclingkonflikte (Ga, Ta) siehe Kapitel 5.4.1.

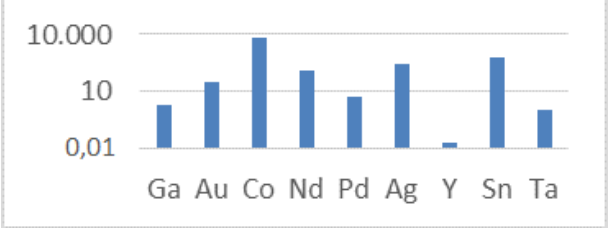
5.4.9 Mobiltelefone (Handy, RePro Produktgruppe 3.10 und Smartphone, RePro Produktgruppe 3.11)

Abbildung 65: Produktprofil Handy (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 66: Produktprofil Smartphone (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Mobiltelefone enthalten üblicherweise LED-Hintergrundbeleuchtungen. Eine Entfrachtung entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 ist aufgrund der enthaltenen Batterie notwendig.

Eine manuelle Separation der Leiterplatte ist zeitaufwendig. Entsprechende Zusatzerlöse liegen üblicherweise deutlich unter den Zusatzkosten. Die Verwertung entfrachteter Geräte in Anlagen zur Rückgewinnung von Kupfer, Edelmetallen (inkl. PGM) und Sb ist möglich.

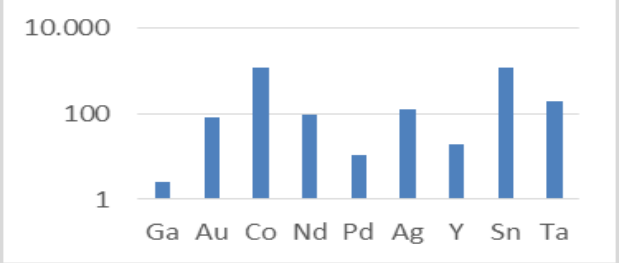
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen erfolgt in der integrierten Kupferhütte in gleichem Maße, wie aus den Leiterplatten, wenn die Mobiltelefone nach der Entfrachtung direkt in der Anlage verwertet werden.

Vorschläge für eine Vorbehandlung:

- Separation der Akkumulatoren, Zuführung der Akkumulatoren in die Batterieverwertung mit Rückgewinnung des Co,
- Zuführung der entfrachteten Geräte in die Rückgewinnung von Edelmetallen und PGM.

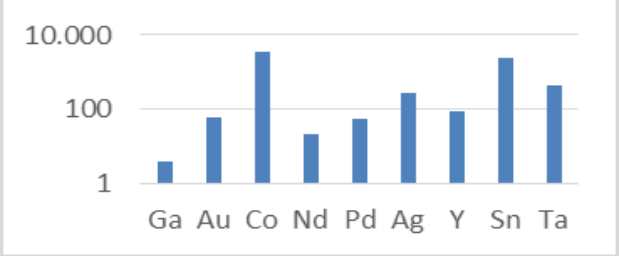
5.4.10 Digitalkamera (Foto, RePro Produktgruppe 3.12), Camcorder (RePro Produktgruppe 3.13)

Abbildung 67: Produktprofil Digitalkamera (Foto) (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 68: Produktprofil Camcorder (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Die Displays von Digitalkameras (Foto, Video) sind üblicherweise mit einer LED-Hintergrundbeleuchtung ausgestattet.

Eine Rückgewinnung von RePro-Metallen aus LED (nach einer vorherigen Separation der LED) ist großtechnisch nicht etabliert.

Die Batterien von Altgeräten sind inzwischen zu hohen Anteilen Li-Ionen Batterien, da die Nutzungsdauer der Wechselbatterien deutlich kürzer ist, als die der Kameras (2 Jahre vs. 11 Jahre). Die Entfrachtung muss nach Anhang III ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 erfolgen. Hierüber erfolgt eine Aufkonzentration der Co-Gehalte in einer separierten Fraktion.

Die Leiterplatten von Digitalkameras weisen vergleichsweise hohe Gehalte an Edelmetallen, PGM und Ta auf. Erlöse, die die Zusatzkosten aus der manuellen Demontage decken, werden in der Regel nicht erzielt. Zu den Rückgewinnungskonflikten bei Ta in Kondensatoren auf Leiterplatten siehe Kapitel 5.4.1.

Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

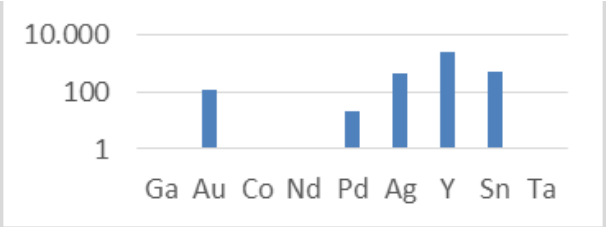
Eine Rückgewinnung (nach vorheriger Separation) von In und Leuchtstoffen aus Flachbildschirmen ist derzeit nicht großtechnisch etabliert.

Vorschläge für die Vorbehandlung:

- Separation der Akkumulatoren und Zuführung in eine Batterieverwertung mit Co-Rückgewinnung,
- Separation der Leiterplatten (ggf. nach mechanischem Grobaufschluss) und Zuführung zur Edelmetall und PGM-Rückgewinnung

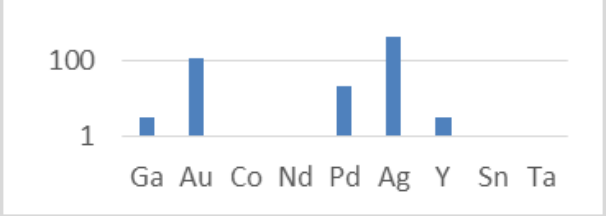
5.4.11 LCD Monitore (RePro Produktgruppen 3.14 und 3.15)

Abbildung 69: Produktprofil LCD Monitor mit CCFL (Angaben in mg/Produkt)



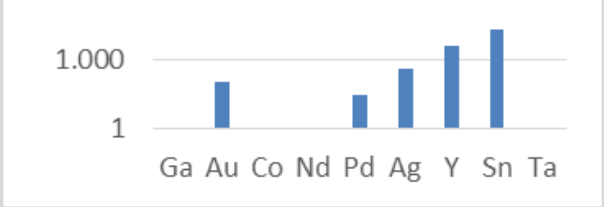
Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 70: Produktprofil LCD Monitor mit LED (Angaben in mg/Produkt)



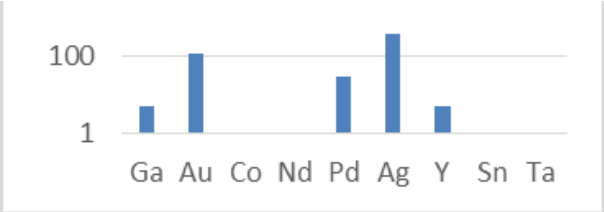
Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 71: Produktprofil LCD Fernseher mit CCFL (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 72: Produktprofil LCD Fernseher mit LED (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Flachbildschirme, die als Altgeräte in die Entsorgung gelangen, weisen zu überwiegenden Anteilen Hg-haltige Hintergrundbeleuchtungen auf. Eine Entfrachtung muss entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 erfolgen. Eine Kennzeichnung zur Verwendung von Hg ist nicht vorhanden.

Eine Rückgewinnung (nach vorheriger Separation) von In und Leuchtstoffen aus Flachbildschirmen ist derzeit nicht großtechnisch etabliert.

Bei den Leiterplatten, die die wesentlichen Mengen von Edelmetallen, PGM und Sn enthalten, handelt es sich um die Ansteuereinheiten, die zwar klein sind, aber vergleichsweise hohe Edelmetall bzw. PGM-Konzentrationen aufweisen. Die Separation im Rahmen der oder im Anschluss an die Entfrachtungsbehandlung ist mit geringem zusätzlichen Zeitaufwand möglich.

Durch die manuelle Separation der PMMA-Frontscheibe kann eine sehr reine und werthaltige Kunststofffraktion gewonnen werden.

Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Eine Rückgewinnung von RePro-Metallen aus LED (nach einer vorherigen Separation der LED) ist großtechnisch nicht etabliert.

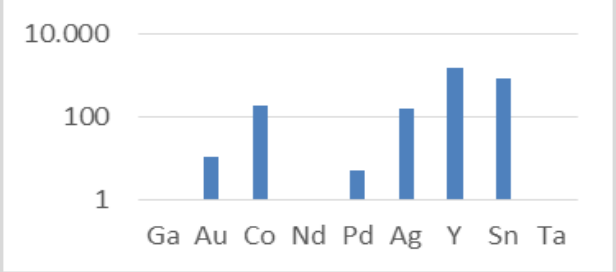
Vorschläge für eine Vorbehandlung:

- Behandlung zur Hg-Entfrachtung
- Manuelle Separation der Leiterplatten, Zuführung in die Edelmetall- und PGM-Rückgewinnung

- Eine Behandlungsanforderung zur Separation der PMMA-Frontscheibe ist nicht erforderlich, wenn die Geräte entfrachtet werden, da dies aufgrund der ökonomischen Anreize sowieso erfolgt. Bei LED-Hintergrundbeleuchtungen kann eine entsprechende Behandlungsanforderung sinnvoll sein, wenn die ökologische Bewertung einen entsprechenden Zeitaufwand rechtfertigt.

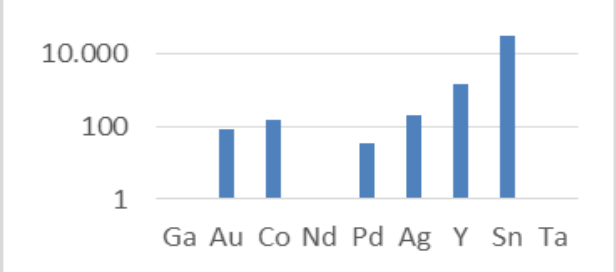
5.4.12 CRT-Geräte (Monitor, Fernseher, RePro Produktgruppe 3.16)

Abbildung 73: Produktprofil Monitor Röhre (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 74: Produktprofil Fernseher Röhre (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Die Separation der Röhre muss aufgrund der Anforderungen des Anhangs 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 erfolgen.

Die Separation der Frontglasbeschichtung (Leuchtpulver) nach einer Trennung von Front- und Konusglas ist großtechnisch etabliert. Das Leuchtpulver wird derzeit nicht verwertet. Zwar sind die Verfahren theoretisch verfügbar (siehe Anhang 10.7), doch werden Leuchtpulver aus CRT aufgrund der Unterschiede in der Zusammensetzung im Vergleich zum Leuchtpulver aus Gasentladungslampen jedoch nicht oder nur gegen Zuzahlungen angenommen.

Leiterplatten weisen vergleichsweise geringe PGM-Gehalte auf (Klasse 3-Leiterplatten).

Sb wird in Leiterplatten und Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

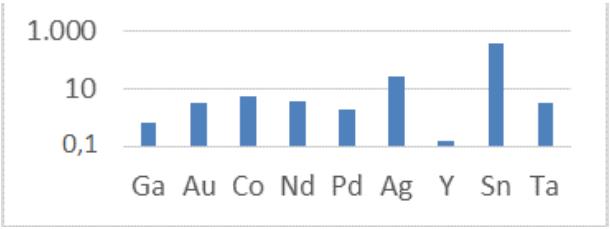
Kunststoffgehäuse von Altgeräten können bromhaltige Flammschutzmittel enthalten. Eine entsprechende Kennzeichnung erfolgt nicht.

Vorschläge für eine Vorbehandlung

- Separation der Röhre
- Separation der Leiterplatten ggf. nach mechanischem Grobaufschluss und Zuführung in die Edelmetall- bzw. PGM-Rückgewinnung

5.4.13 Fernbedienung (RePro Produktgruppe 3.17)

Abbildung 75: Produktprofil Fernbedienung (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Fernbedienungen enthalten Batterien und müssen daher entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 entfrachtet werden.

Die Leiterplatten der Fernbedienung weisen eine vergleichsweise geringe Konzentration von Edelmetallen und PGM auf.

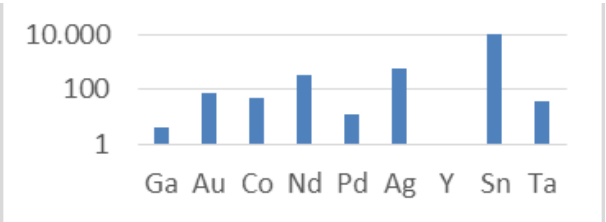
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen kann ggf. in der integrierten Kupferhütte erfolgen, wenn die Fernbedienung nach der Entfrachtung direkt in der Hütte verwertet wird.

Vorschlag für eine Vorbehandlung:

- Separation der Akkumulatoren/Batterien und Zuführung in die Batterieverwertung mit Co-Rückgewinnung

5.4.14 DVD-Player (RePro Produktgruppe 3.18)

Abbildung 76: Produktprofil DVD -Player (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Üblicherweise enthalten Leiterplatten aus mengenrelevanten Typen von DVD-/CD-Playern relativ geringe Konzentrationen von Edelmetallen und PGM (Klasse 3-Leiterplatten).

Mobile Geräte enthalten Batterien und müssen entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 entfrachtet werden.

Nd-Magnete können in den Motoren verwendet werden. Sie weisen eine geringe Größe auf und sind aufgrund der stabilen Umschließung nur aufwendig separierbar. Eine Rückgewinnung von Nd ist großtechnisch nicht etabliert.

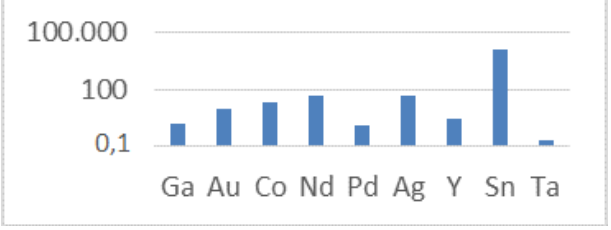
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschlag für eine Vorbehandlung:

- Separation der Leiterplatten ggf. nach Grobaufschluss und Zuführung in die Edelmetall- bzw. PGM-Rückgewinnung

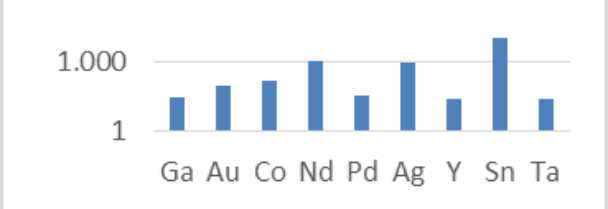
5.4.15 Videospiel tragbar, Videospielkonsole (RePro Produktgruppen 3.19, 3.20)

Abbildung 77: Produktprofil Videospiel tragbar (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 78: Produktprofil Videospielkonsole (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Die Bildschirme der tragbaren Videospiele bzw. Videospielkonsolen, die derzeit als Altgeräte entsorgt werden, enthalten üblicherweise eine LED-Hintergrundbeleuchtung.

Mobile Geräte enthalten Batterien und müssen daher entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 entfrachtet werden.

Die Geräte enthalten Leiterplatten mit mittleren bis höheren Edelmetall- und PGM-Konzentrationen (Klasse 2).

Eine Rückgewinnung (nach vorheriger Separation) von In und Leuchtstoffen aus Flachbildschirmen ist derzeit nicht großtechnisch etabliert.

Zu den Rückgewinnungskonflikten zwischen Edelmetallen bzw. PGM und Ga bzw. Ta siehe Kapitel 5.4.1.

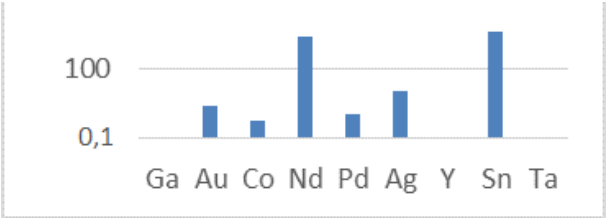
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschläge für eine Vorbehandlung:

- Separation der Batterien und Zuführung in die Batterieverwertung mit Co-Rückgewinnung
- Separation der Leiterplatten ggf. nach Grobaufschluss und Zuführung zur Edelmetall- und PGM-Rückgewinnung
- Zu den zukünftigen Perspektiven zur Frage der Separation von Ta-Kondensatoren von den Leiterplatten siehe Kapitel 6 dieses Berichts

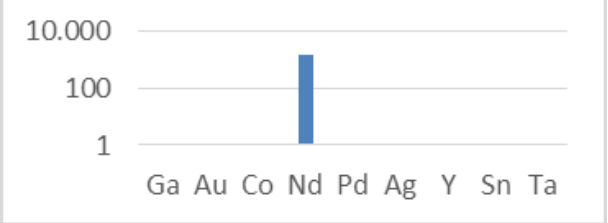
5.4.16 Lautsprecherboxen, Kopfhörer (RePro Produktgruppen 3.22, 3.23)

Abbildung 79: Produktprofil Lautsprecherboxen (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 80: Produktprofil Kopfhörer (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Nd ist in den Magneten moderner Lautsprecher/Kopfhörer enthalten. Üblicherweise handelt es sich um voll- bzw. teilumkapselte Bauarten. In Lautsprechern/Kopfhörern älterer Bauart oder niedrigpreisigen Modellen sind üblicherweise Ferritmagnete enthalten.

Eine großtechnische Rückgewinnung von Nd ist nicht etabliert.

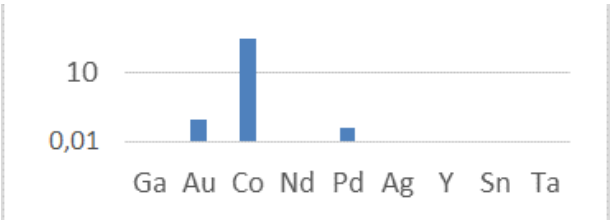
Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschlag für eine Vorbehandlung:

- Mechanischer Aufschluss und Separation in die Wertfraktionen

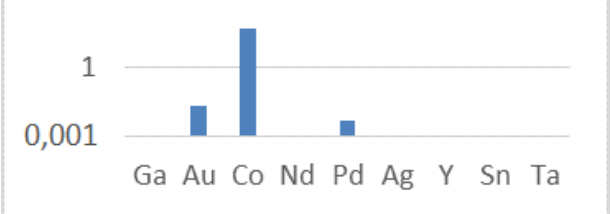
5.4.17 Batteriebetrieben Geräte: Bohrmaschine (RePro Produktgruppe 5.1), Wecker (RePro Produktgruppe 5.2), Rasierapparate (RePro Produktgruppe 5.4)

Abbildung 81: Produktprofil Bohrmaschine (Akku) (Angaben in mg/Produkt)



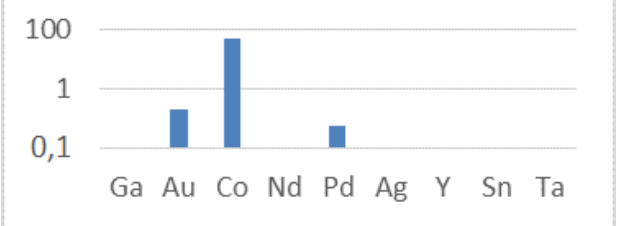
Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 82: Produktprofil Wecker (Akku) (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 83: Produktprofil Rasierapparat (Akku) (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Alle drei Gerätearten müssen aufgrund der enthaltenen Batterien entsprechend Anhang 3 ElektroG bzw. der Anlage 4 des ElektroG-2 entfrachtet werden.

Co ist (wenn vorhanden) in den Batterien lokalisiert. Die Gehalte von Edelmetallen bzw. PGM in den Leiterplatten sind sehr gering.

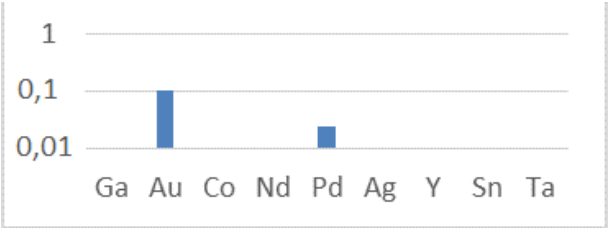
Sb wird in Leiterplatten und Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich. Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschläge für eine Vorbehandlung:

- Separation der Batterie und Zuführung in die Batterieverwertung ggf. mit Co-Rückgewinnung
- Mechanischer Aufschluss des Restgerätes und Separation Leiterplattenfraktion

5.4.18 Kaffeemaschinen (RePro Produktgruppe 5.3)

Abbildung 84: Produktprofil Kaffeemaschine (Angaben in mg/Produkt)



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung

Die Leiterplatten moderner Kaffeemaschinen enthalten nur sehr geringe Konzentrationen an Edelmetallen und PGM.

Sb wird in Leiterplatten und ggf. in Gehäusekunststoffen als Flammschutzmittel (Synergist) eingesetzt. Die Rückgewinnung aus Leiterplatten ist in der integrierten Kupferhütte möglich.

Für die Rückgewinnung von Sb aus Gehäusekunststoffen ist kein Behandlungsweg großtechnisch etabliert.

Vorschlag für eine Vorbehandlung:

- Separation einer kupferreichen Fraktion und Zuführung in die Kupferrückgewinnung

5.4.19 Fazit

5.4.19.1 Rückgewinnungsverfahren

Die Rückgewinnung von RePro-Metallen aus den RePro-Produkten bzw. den Fraktionen aus ihrer Aufbereitung ist großtechnisch vor allem für Edelmetalle, PGM und Zinn etabliert. Für die Rückgewinnung von Kobalt stehen entsprechende Techniken zur Verfügung (siehe Kapitel 5.2 sowie Anhang Kapitel 10.7).

Für die Rückgewinnung von Indium und Tantal stehen die Technologien großtechnisch zwar zur Verfügung (für Abfälle aus Produktionsprozessen). Die Separation dieser RePro-Metalle aus den Geräteverbünden ist jedoch nicht etabliert.

Bei Gallium und Tantal, besteht das Problem des Verlustes von Edelmetallen und PGM in der Vorbehandlung, wenn Chips bzw. Kondensatoren aus dem Leiterplattenverbund gelöst werden und die entstehenden Fraktionen der Ga- bzw. Ta-Rückgewinnung zugeführt werden. Solange keine verlustarme Separationstechnik etabliert ist, sollte der Rückgewinnung möglichst großer Anteile von Edelmetallen bzw. PGM der Vorrang gegeben werden.

Die Rückgewinnung von Antimon ist derzeit nur aus Leiterplatten etabliert.

Eine Rückgewinnung von Beryllium aus RePro-Geräten oder Fraktionen ist nicht etabliert und in absehbarer Zeit auch nicht zu erwarten.

Die Rückgewinnung von Neodym steht nur im Pilotmaßstab zur Verfügung.

Für die Rückgewinnung von Leuchtpulvern aus Gasentladungslampen stehen Rückgewinnungswege großtechnisch zur Verfügung. Für solche aus CRT ist dies nicht der Fall.

5.4.19.2 Separationsanforderungen (Komponenten, Fraktionen)

Aus der Betrachtung der Vorbehandlungsnotwendigkeiten, kann abgeleitet werden, dass zum Zweck der Gold-, Silber- und Palladiumrückgewinnung Leiterplatten aus EAG zu entnehmen sind. Für PC und LCD-Monitore und -Fernsehgeräte besteht hinsichtlich dieser Komponenten auch eine besondere Mengenrelevanz.

Kleine und kompakte Geräte, wie USB Sticks, Mobiltelefone, Smartphones, Tablets und Navigationsgeräte, können nach der Schadstoffentfrachtung vollständig vom Gerätestrom separiert und der Metallrückgewinnung gemäß der Kupferroute zugeführt werden. Bei Geräten mit minderwertigen und im Vergleich zur Gerätegröße relativ kleinen Leiterplatten ist die Leiterplattensepartion zum Zweck der Ressourcensicherung zwar wünschenswert, das Verhältnis von Nutzen und Aufwand ist jedoch sehr ungünstig.

Aus den im Rahmen der Schadstoffentfrachtung sämtlicher EAG separierten Batterien kann eine Kobaltrückgewinnung erfolgen.

5.4.19.3 Separationsanforderungen (Geräte)

Für eine optimierte Rückgewinnung und Vorbehandlung sollten Geräte mit besonders wertvollen Leiterplatten aus dem Gesamtinputstrom der Erstbehandlung separiert werden (PC, Laptop, Tablets, Mobiltelefone, Videospielkonsolen).

Festplatten müssen für eine Rückgewinnung des enthaltenen Nd separiert werden.

Für die Rückgewinnung von Ga und Ta müsste eine Separation von Geräten mit den entsprechenden Leiterplatten aus dem Gesamtinputstrom erfolgen (Laptop, Tablet, PC). Zu den Möglichkeiten der Separation der Komponenten von den Leiterplatten siehe das folgende Kapitel.

Zur Rückgewinnung von RePro-Metallen aus Leuchtpulvern muss eine Separation der entsprechenden Geräte und Komponenten erfolgen (z. B. Leuchtstoffröhren). Dies ist aber in jedem Fall aufgrund von Schadstoffaspekten und den Separationsanforderungen der Anhang 3 ElektroG notwendig.

Die verbleibenden RePro-Geräte können aus der Sicht der Rückgewinnung von RePro-Metallen gemeinsam vorbehandelt werden.

Für eine Optimierung der Kreislaufschließung der RePro-Zielmetalle sollte jedoch auch eine vorausschauende Perspektive eingenommen werden und entsprechende Handlungsansätze dargelegt werden. Dies erfolgt im Abschnitt zu den Handlungsempfehlungen in diesem Bericht (siehe Kapitel 7).

6 Behandlung von RePro-EAG

6.1 Analyse der derzeitigen Behandlung von EAG

Die nachfolgende Beschreibung der Behandlungsprozesse sowie die Analyse hinsichtlich der Auswirkungen auf die Separationsrate/Aufkonzentrierung ressourcenrelevanter Metalle bezieht sich ausschließlich auf EAG der SG 5 und SG 3 ohne Bildschirmgeräte. Dies entsprach der Vorgehensweise nach dem novellierten ElektroG von 2015 vor der Einführung der neuen Gerätekategorien 2018.

Die Betrachtung verschiedener Behandlungsprozesse hat gezeigt, dass sich Vorsortierung, Schadstoffentfrachtung sowie nachfolgende Behandlung durch verschiedene mechanische Zerkleinerungs- und Trennprozesse sowie teilweise auch manuelle Demontage einem ähnlichen Schema folgen. Basierend auf einer umfassenden Kenntnis des Standes der angewandten Prozesstechnik bei den wesentlichen Marktteilnehmern wurde dieses allgemeine Behandlungsschema analysierung und Versuchen zur Separation/Aufkonzentrierung der RePro-Metalle zugrunde gelegt.

6.2 Prozessbeschreibung

Die EAG der SG 3 und SG 5 werden häufig als Schüttgut angeliefert und gemischt der Behandlung zugeführt. In Abbildung 85 ist die Behandlung durch die drei Prozessschritte Vorsortierung/Schadstoffentfrachtung, Vorzerkleinerung und Handklaubung gezeigt, welche der weiteren mehrstufigen Verfahrenstechnik vorgelagert sind. Je nach Betriebskonzept erfolgt die Behandlung in dieser Form; aber auch alternativ durch unmittelbare Vorzerkleinerung und anschließender Handklaubung oder auch durch eine ausschließlich manuelle Vorzerlegung.

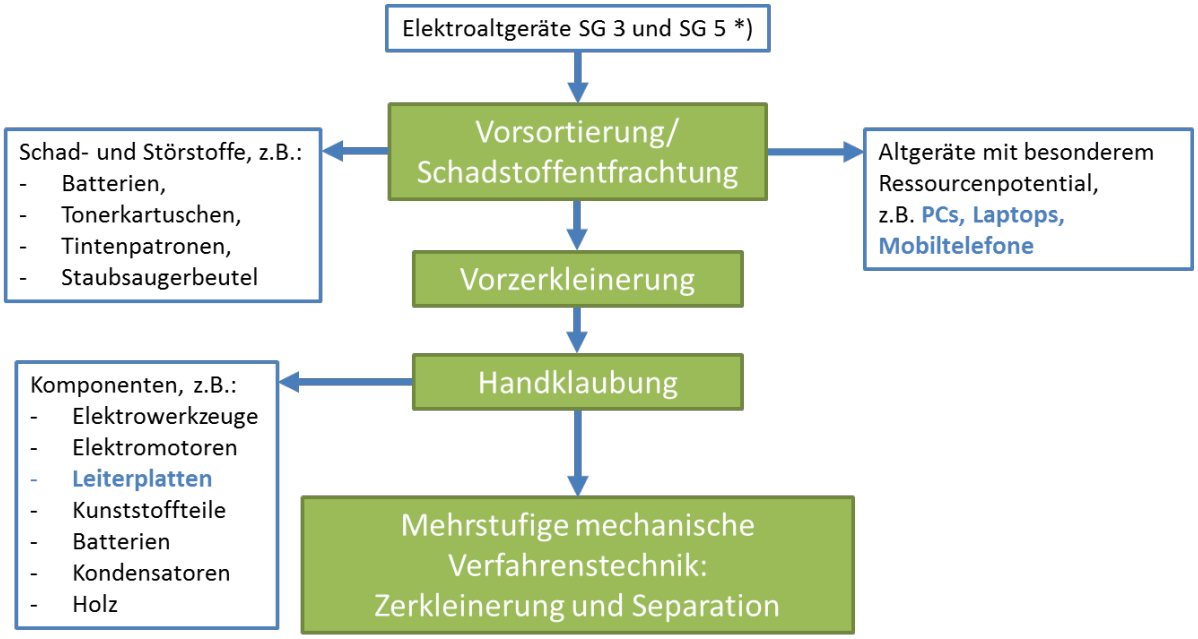
Findet eine explizite Vorsortierung/Schadstoffentfrachtung statt, werden i.d.R. folgende Stoffe, Komponenten und Geräte ausgeschleust:

Schad- oder Störstoffe, welche in die weiteren Prozessschritte verschleppt werden können und entsprechende Fraktionen verunreinigen (z. B. quecksilberhaltige Schalter, Staubsaugerbeutel, Tonerkartuschen, Tintenpatronen),

Komponenten, für die individuelle und effizientere Verfahren existieren, um Wertstoffe einschließlich ressourcenrelevanter Materialien zu separieren bzw. für die gesetzliche Vorgaben für die Behandlung existieren (z. B. Batterien),

EAG mit besonderem Ressourcenpotenzial, die aufgrund ihrer spezifischen Materialstruktur eine relativ hohe Konzentration von Edelmetallen aufweisen (z. B. Mobiltelefone, Smartphones, Tablets) oder entsprechende Komponenten enthalten (z. B. PCs, Laptops) und die für eine umfassendere Rückgewinnung dieser Stoffe separat zu behandeln sind.

Abbildung 85: Prozessbeschreibung der Behandlung von EAG der SG 3 und SG 5



*) ohne Bildschirmgeräte

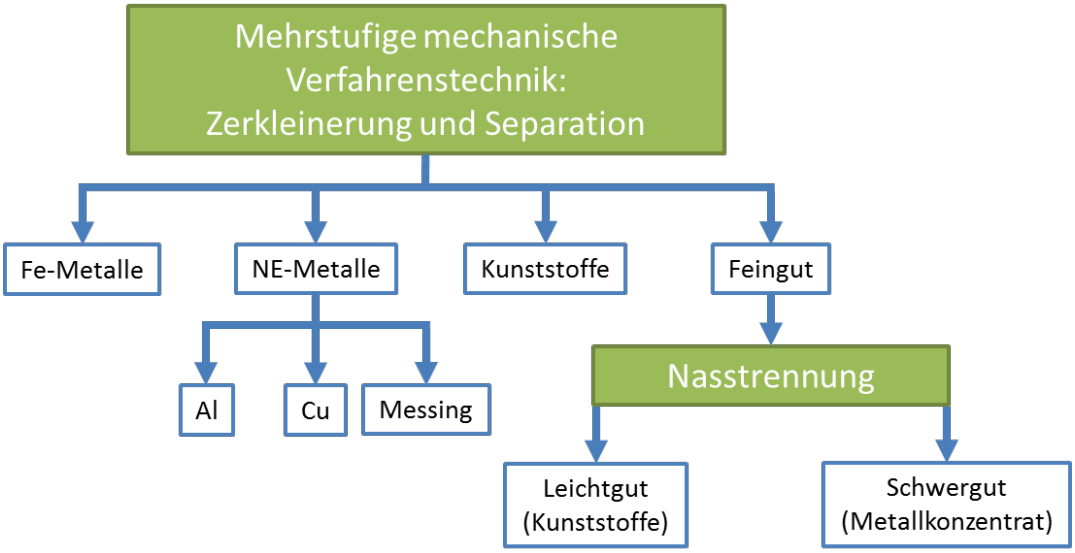
Quelle: eigene Darstellung

In der nachfolgenden Vorzerkleinerung werden die EAG grob aufgeschlossen. Die anschließende Handklaubung verfolgt vergleichbare Ziele wie die Vorsortierung und Schadstoffentfrachtung, jedoch können hier auch Komponenten entnommen werden, für die eine weitere Aufbereitung mit der nachfolgenden Verfahrenstechnik nicht sinnvoll ist, insbesondere da

- eine Entnahme gesetzlich geregelt ist (z. B. Kondensatoren, Batterien),
- keine Wertschöpfung erzielbar ist (z. B. Holz, größere Kunststoffteile),
- eine höhere Wertschöpfung nur durch spezifischere Verfahren erfolgen kann (z. B. hochwertige Platinen),
- die Behandlung in den weiteren, auf Kleingeräte abgestimmten Zerkleinerungsstufen zu erhöhtem Anlagenverschleiß führen kann (z. B. Elektromotoren, Transformatoren, Elektrowerkzeuge).

Durch Kombination von verschiedenen Zerkleinerungs- bzw. Separationsstufen wie Magnetscheidung, Wirbelstromscheidung, Windsichtung, Siebung oder optische Separation werden in der anschließenden trockenmechanischen Aufbereitung marktfähige Fraktionen generiert (Abbildung 86).

Abbildung 86: Exemplarische Darstellung der Fraktionen aus der Aufbereitung von EAG mit mechanischer Verfahrenstechnik

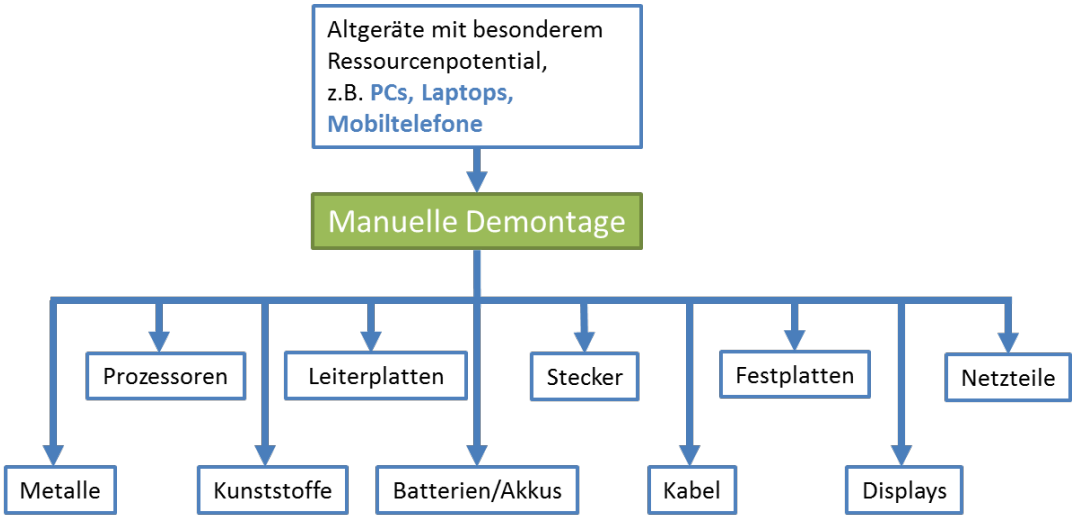


Quelle: eigene Darstellung

Diese sind im Wesentlichen Fe-Metalle, NE-Metalle (Aluminium, Kupfer, Messing)und gemischte Kunststoffe. Es entsteht ferner ein Feingut, welches im Rahmen einer Nasstrennung in einen Kunststoffanteil (Leichtgut) und ein Metallkonzentrat (Schwergut) separiert werden kann.

Die im Rahmen der Vorsortierung entnommenen EAG mit hohem Ressourcenpotenzial werden auch bei Recyclingbetrieben mit Behandlungsanlagen mit Durchsätzen von mehreren 10.000 t/a einer manuellen Demontage zugeführt (Abbildung 87).

Abbildung 87: Exemplarische Darstellung der Fraktionen aus der manuellen Zerlegung von EAG mit besonderem Ressourcenpotenzial



Quelle: eigene Darstellung

Aus Mobiltelefonen und Smartphones werden die Akkus entnommen. Das Restgerät stellt bereits eine Ausgangsfraktion für die extern erfolgende Rückgewinnung dar.

PCs und Laptops werden in einzelne Komponenten gemäß Abbildung 87 zerlegt, welche standardisierten Fraktionen für die weitere Aufbereitung oder direkte Rückgewinnung entsprechen.

6.3 Auswirkungen auf die Separationsrate/Aufkonzentrierung ressourcenrelevanter Metalle

Aus ökonomischer Sicht dient die Behandlung von EAG primär dem Ziel, möglichst große Mengen von metallangereicherten Fraktionen zu erzeugen. Wie bereits oben dargestellt sind Fe-Metalle, Aluminium und Kupfer die wesentlichen Metall-Fraktionen. In Abbildung 52 sind die Hauptprozesse der Pyro- und Hydrometallurgie für die wichtigsten Basismetalle gezeigt. Neben einer hohen Separationsrate und starken Aufkonzentrierung ist die Kompatibilität der Rückgewinnungsverfahren der ressourcenrelevanten Metalle zu den Basismetallen der gleichen Outputfraktion der Behandlung entscheidend für deren Rückgewinnung.

Nachfolgend werden die Potenziale der grundlegenden Behandlungsprozesse für die Separation und Aufkonzentrierung der ressourcenrelevanten Metalle bewertet und mögliche Rückgewinnungswege aufgezeigt.

6.3.1 I. Aufkonzentrierung durch Vorsortierung und Schadstoffentfrachtung

Die Entnahme von Batterien ermöglicht eine effektive Separation von Kobalt aus Li-Ionen- und Ni-MH-Batterien. Durch Zuführung in spezielle Recyclingprozesse für Batterien können nicht nur Kobalt, sondern prinzipiell auch die Metalle der Seltenen Erden zurückgewonnen werden (Abbildung 52). Das Aussortieren der PCs, Laptops, Mobiltelefone und Smartphones stellt den ersten wichtigen Schritt zur Aufkonzentrierung ressourcenrelevanter Metalle durch die nachfolgende manuelle Demontage dar (siehe unten).

6.3.2 II. Aufkonzentrierung durch Handklaubung

Fest eingebaute Batterien, welche nicht bei der Vorsortierung entnommen wurden, werden durch die Vorzerkleinerung freigelegt, anschließend manuell separiert und dem Batterierecycling zugeführt.

Durch das Aussortieren von Festplatten von ggf. im Mengenstrom verbliebenen PCs bzw. Laptops erfolgt eine Aufkonzentrierung von Gold, Silber, Palladium und Tantal. Mit den ebenfalls enthaltenen Aktuatoren und Spindelmotoren werden außerdem wesentliche Anteile des Neodyms aus dem Mengenstrom ausgeschleust. Entscheidend für die Rückgewinnung der genannten Metalle ist die weiterführende Behandlung der Festplatten, entweder durch trockenmechanische Aufbereitung oder manuelle Demontage (siehe unten).

Wenn elektronische Geräte nicht für manuelle Demontage aussortiert werden, sondern direkt in die Vorzerkleinerung gelangen, können anschließend Bruchstücke von Platinen mit z. T. hohen Gehalten an Gold, Silber, Palladium, Gallium, Zinn, Tantal und Antimon aussortiert werden. Diese Möglichkeit besteht bei Geräten der Telekommunikations-

und Unterhaltungselektronik, bei denen die manuelle Demontage nicht wirtschaftlich ist. Das separierte Platinenmaterial wird Kupferhütten zugeführt.

6.3.3 III. Aufkonzentrierung durch trockenmechanische Aufbereitung

Die Verfahrensabfolge und die Art der eingesetzten Aggregate für die trockenmechanische Aufbereitung unterscheiden sich von Betrieb zu Betrieb. Der Prozess ist jedoch stets auf eine hohe Wertschöpfung von Fe- und NE-Metalle ausgerichtet, wobei die Edelmetalle in einer Cu-Fraktion angereichert werden. Neodym, meist aus Festplatten, Elektromotoren oder Lautsprecherkomponenten, gelangt dabei in die Fe-Fraktion oder reichert sich an den ferromagnetischen Komponenten der ersten Zerkleinerungs- bzw. Separationsstufen an. Die während des Zerkleinerungsprozesses entstehende Staubfraktion kann ebenfalls Edelmetalle enthalten, welche in Hütten und Scheideanstalten zurückgewonnen werden können.

6.3.4 IV. Aufkonzentrierung durch Nasstrennung

Durch die Nasstrennung wird das Feingut in Fraktionen unterschiedlicher Dichte separiert. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um ein kunststoffreiches Leichtgut und ein metallreiches Schwergut. Je nach Beschaffenheit des Feinguts kann aber auch eine höhere Trennschärfe erzielt werden, so dass hier im Idealfall die Fraktionen Kunststoffe, Aluminium, Fe-Metalle und Kupfer mit sonstigen Schwermetallen erzeugt werden können. Auch hier gelten die Einschränkungen der metallurgischen Prozesse für die Rückgewinnung ressourcenrelevanter Metalle (Abbildung 52). Weitere Verluste entstehen durch den ungewünschten Austrag in das Leichtgut, das aufgrund des hohen Kunststoffanteils nur einen geringen Marktwert hat und für die Rückgewinnungsprozesse nicht gut geeignet ist.

6.3.5 V. Aufkonzentrierung durch manuelle Demontage

Sortierkriterien für bestückte Platinen (Mainboards, Speicherkarten, weitere PC-Steckkarten, Mobiltelefone) und Prozessoren (je nach Gerätegeneration) sowie Festplatten orientieren sich an den erlösbestimmenden Edelmetallgehalten (Gold, Silber und Palladium) und stellen so eine gezielte Anreicherung dieser ressourcenrelevanten Metalle dar, wobei als Nebeneffekt auch Gallium, Zinn, Tantal und Antimon angereichert werden. Goldbeschichtete Stecker werden ebenfalls gezielt als Fraktion gesammelt. Die genannten Edelmetalle und Zinn werden in den nachfolgenden Prozessen der Kupferhütten und Scheideanstalten zurückgewonnen, während Gallium, Tantal und Antimon als Bestandteile von Schlacken und Rauchgasen verloren gehen.

Mit der Separation von Festplatten, DVD/CD-Laufwerken und Platinen von Mobiltelefonen und Smartphones könnte eine Aufkonzentrierung von Neodym erreicht werden. Eine gezielte Aufkonzentrierung von Neodym erfolgt jedoch in der Praxis derzeit nicht.

Durch die manuelle Demontage können auch fest eingebaute Batterien separiert werden, welche während des ersten Schadstoffentfrachtungsschritts noch nicht zugänglich sind.

In der Fraktion Displays reichern sich bei Bauarten mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung die ressourcenrelevanten Metalle Indium aus ITO-Schichten und Yttrium aus der CCFL-Leuchtschicht an. Bei Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung sind dies neben Indium

aus ITO und des Yttriums aus dem Leuchtstoff die Elemente, Indium und Gallium aus den Halbleitermaterialen der LEDs.

6.4 Struktur der Behandlungsanlagen für EAG in Deutschland

Gemäß der Rücknahmestatistik der Stiftung ear für 2013 wurden in der SG 3 239.312 t EAG und in der SG 5 96.457 t EAG gesammelt. Ohne den Anteil an Bildschirmgeräten von ca. 58 % in der gemischten SG 3 ergibt sich eine Gesamtmenge von etwa 196.000 t EAG. Dem gegenüber stehen 225 Recyclingbetriebe (Stand 2011), die gemäß ElektroG (Gesetzentwurf der Bundesregierung (2015)) als Erstbehandlungsanlage zertifiziert sind.

Zu den jeweiligen Kapazitäten und den tatsächlich verarbeiteten Mengen an EAG in diesen Anlagen sind keine genauen Daten verfügbar. Es ist davon auszugehen, dass die Verarbeitung von etwa 60 % der hier betrachteten 196.000 t EAG in den drei größten Anlagen von jeweils einer Kapazität von 40.000–50.000 t/a erfolgte. Darin sind ebenfalls Mengen von EAG enthalten, die bei kleinen Erstbehandlungsbetrieben nur vorsortiert oder in sehr begrenztem Maße vorbehandelt wurden.

Etwa 20-30 % werden in einigen kleineren Anlagen mit Kapazitäten von bis zu 20.000 t/a aufbereitet. Die restlichen 10 bis 20 % der EAG werden entweder bei kleinen Erstbehandlern vollständig demontiert, zur Wieder- und Weiterverwendung vorbereitet oder zur Behandlung exportiert.

In den drei größten Behandlungsanlagen für EAG erfolgt die Behandlung überwiegend nach dem Schema gemäß Abbildung 85. Dabei werden Vorzerkleinerung und Handklaubung nur in einer Anlage umfassend durchgeführt. Die weitere verfahrenstechnische Aufbereitung erfolgt durch individuelle Kombination und Verkettung mehrerer Zerkleinerungs- und Separationsstufen, wobei für Prozessschritte mit ähnlicher Zielsetzung unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen können. Je nach betriebsspezifischer Konfiguration der Aufbereitungsstufen entstehen Feinfraktionen unterschiedlicher Körnung, Struktur und Materialzusammensetzung. In Abhängigkeit davon werden die Feinfraktionen in entsprechenden Nasstrennstufen separiert, was ebenfalls an den jeweiligen Standorten der Behandlungsanlagen erfolgt.

Die verfahrenstechnische Aufbereitung in den kleineren Anlagen erfolgt sowohl mit als auch ohne explizite Vorzerkleinerung und Handklaubung. Der wesentliche Unterschied zu den großen Anlagen liegt in der oft geringeren Tiefe der verfahrenstechnischen Aufbereitung ohne nachgeschaltete Nasstrennung des Feinguts. Das Feingut wird in diesem Fall an Unternehmen mit speziellen Trennanlagen oder direkt an Hütten weitergegeben.

Unabhängig von Größe und Art der Behandlungsanlage sind die Betreiber bestrebt, im Rahmen der Vorbehandlung und Schadstoffentfrachtung Komponenten mit hohen Anteilen an Edelmetallen zu separieren und einer gesonderten Zerlegung (PCs, Laptops, Mobiltelefone) oder Behandlung (hochwertige Platinen, Laufwerke) zuzuführen. Findet keine Vorzerkleinerung und Handklaubung statt, wird die Vorsortierung zumeist intensiver auf die Separierung solcher Komponenten ausgerichtet. Wird dagegen zusätzlich eine Vorzerkleinerung und Handklaubung angewandt, so können zusätzlich in Geräten verbaute Elektromotoren, hochwertige Platinen oder Batterien entnommen werden. Insbesondere für die in den Elektromotoren enthaltenen Metalle der Seltenen Erden besteht hier die Möglichkeit der Aufkonzentrierung. Insgesamt wird die Aufkonzentrierung von ressourcenrelevanten Metallen im Rahmen der Vorbehandlung sehr stark

durch die Qualität und Ausrichtung der manuellen Sortierschritte beeinflusst. Die nachfolgende, mehrstufige verfahrenstechnische Aufbereitung einschließlich Nasstrennung führt bei den großen Anlagen, abgesehen von einigen individuell konfigurierten Prozessen, zu ähnlichen Fraktionen mit qualitativ vergleichbaren stofflichen Zusammensetzungen.

Kleinere Anlagen erzielen im Vergleich zu großen aufgrund der weniger komplexen Prozessführung häufig einen geringeren Aufschluss und dadurch auch eine weniger differenzierte Trennung der Stoffgemische. Im Sinne der ressourcenrelevanten Metalle muss dadurch noch kein negativer Effekt entstehen, da einzelne Fraktionen in anderen Anlagen weiterbehandelt werden können. Es besteht jedoch die Gefahr, dass dort Stoffströme aus der Behandlung von EAG mit anderen Stoffströmen vermischt werden und so eine Verdünnung bestimmter Metalle erfolgen kann. Für das Endergebnis ist dann entscheidend, ob eine Aufkonzentrierung der verdünnten Metalle im weiteren Prozessablauf gelingt oder nicht.

6.5 Literaturrecherche zu Material- und Stoffflussanalysen der Behandlung von EAG

Die Literaturrecherche war fokussiert auf Arbeiten zu Material- und Stoffflussanalysen in großtechnischen Anlagen zur Aufbereitung von EAG. Es wurden insgesamt zehn Veröffentlichungen identifiziert, in denen die Ergebnisse von sechs unabhängigen Untersuchungen beschrieben werden. Die Datengrundlagen stammen aus den Jahren 1988 bis 2009 (Tabelle 85). Die Angaben zu den Gerätetypen, verwendeten Verfahren bzw. Anlagen und einzelnen Prozessschritten sind unterschiedlich detailliert und in vielen Fällen lückenhaft. Einzelheiten des Anlagenbetriebs und prozesstechnische Parameter werden in aller Regel zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen nicht veröffentlicht.

Tabelle 85: Literaturübersicht großtechnischer Versuche zur Aufbereitung von EAG mit Angabe des Bezugsjahres der Daten, der untersuchten Gerätetypen, der verwendeten Verfahren bzw. Anlagen und der einzelnen Prozessschritte

Literaturangabe	Bezugsjahr	Gerätetypen	Verfahren/ Anlage	Prozessschritte
Müller, Esther; Widmer, Rolf (2010)	1988-2008	nicht angegeben	nicht angegeben	nicht angegeben

Literaturangabe	Bezugs-jahr	Gerätetypen	Verfahren/ Anlage	Prozessschritte
Morf, Leo; Taverna, Ruedi (2004)	2003	Elektronikgroßgeräte aus Industrie und Gewerbe, Elektro- und Elektronikkleingeräte sowie schon aufbereitete Fraktionen aus vorgeschalteten Sortierbetrieben	Immark AG/ Drisa Entsorgung AG (Schweiz)	Triage/ Handdemontage (Schadstoffentfrachtung); Grobzerkleinerung; Schadstoffentfrachtung und Vorabtrennung von Wertstoffen; Feinzerkleinerung; Wertstoffgewinnung; Nachseparation
Chancerel, Perrine; Rotter, Vera Susanne (2009)	2007	Germany vs. USA: Mobile phones; Desktop personal computers	not specified	not specified
Chancerel, Perrine (2010)		Germany vs. USA: Mobile phones; Desktop personal computers; Cathode-ray tube monitors; Large high-grade equipment; Small high-grade equipment; Low-grade equipment		
Chancerel, Perrine et al. (2011)	2007	not specified	manual; automated mechanical; manual + mechanical	not specified
Chancerel, Perrine et al. (2008)	2008			

Literaturangabe	Bezugs-jahr	Gerätetypen	Verfahren/ Anlage	Prozessschritte
Chancerel, Perrine et al. (2009)		27 t of WEEE classified in collection group 3 (IT, telecommunications, and consumer equipment) excluding CRT monitors	large scale WEEE preprocessing facility in Germany using state of the art technology	manual dismantling; manual removal of problematic components such as batteries, large metal sheets, and motors; coarse preshredding; second manual sorting to remove the remaining hazardous and disturbing components; shredding and automated sorting
Meskers, C.E.M. et al. (2009)	2008/2009	2 x 1,4 t PCs (monofraction)	ELPRO (Germany); Müller-Guttenbrunn (Austria)	two-step manual dismantling/three-step mechanical process including handpicking
Salhofer, S. et al. (2009)				
Schöps, D. et al. (2010)				

Es ist festzustellen, dass sich die einzelnen Untersuchungen in ihrer Ausführung erheblich unterscheiden. Es wurden teilweise sehr spezifische Zusammenstellungen von EAG untersucht, die in Kategorien unterschieden wurden, z. B. nach Sammelgruppen, nach potenziellem Rohstoffwert oder nach Geräteart. Die verwendeten Verfahren, Anlagen und Prozessschritte werden aus den genannten Gründen zumeist nur grob beschrieben. Sofern angegeben, wird nur zwischen manueller und mechanischer Behandlung unterschieden. Die Prozessschritte werden in Einzelfällen schematisch beschrieben, Einzelheiten zu den eingesetzten Aufbereitungs- und Sortiertechnologien werden nicht genannt.

Durch den Einsatz unterschiedlicher Verfahren ergab sich eine prozessabhängige Vielfalt an unterschiedlichen Fraktionen für die Materialflussanalysen (Tabelle 86). Ein direkter Vergleich ist somit kaum möglich. Auf der Stoffebene wurde prioritär Gold behandelt, gefolgt von Silber und Platin. Während es zu In, Sn und Sb in jeweils einem Fall Daten gibt, wurden für Co, Ga, Nd, Y, Ta und Be keine Stoffflussanalysen durchgeführt.

Insgesamt lies die Literaturrecherche kaum Rückschlüsse für die Versuchsplanung zu. Es ließ sich ferner keine allgemeingültige Bewertung von Behandlungsketten oder auch einzelner Prozesse und Technologien durchführen.

Tabelle 86: Literaturübersicht großtechnischer Versuche zur Aufbereitung von EAG mit Angabe der analysierten Material- und Stoffflüsse. Dargestellt ist nur ein Vergleich mit den RePro- Metallen, in einigen Fällen wurden weitere Schad- und Wertstoffe analysiert

Literatur	MFA	SFA Au	SFA Ag	SFA Pd	SFA Co	SFA Ga	SFA In	SFA Sn	SFA Nd	SFA Y	SFA Ta	SFA Sb	SFA Be
Müller, Esther; Widmer, Rolf (2010)	Keine	X					X						
Morf, Leo; Taverna, Ruedi (2004)	brennbare Abfälle; Schadstoffträger; Staub; Cu-Kabel; Leiterplatten; Bildröhrenkomponenten; Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV); feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2; fein-körnige Metallfraktionen 1-4; Metallschrottfraktionen 1-4; Fe-Schrottfraktionen							X				X	
Chancerel, Perrine; Rotter, Vera Susanne (2009)	None	X											
Chancerel, Perrine (2010)	None	X		X									
Chancerel, Perrine et al. (2011)	Collection group 3: IT, telecommunication and consumer equipment; Collection group 5: Small household equipment, tools and toys	X											
Chancerel, Perrine et al. (2008)	Precious-metals rich material; Metal composites; Aluminium; Ferrous metals; Plastics; Metal-poor material	X	X	X									

Literatur	MFA	SFA Au	SFA Ag	SFA Pd	SFA Co	SFA Ga	SFA In	SFA Sn	SFA Nd	SFA Y	SFA Ta	SFA Sb	SFA Be
Chancerel, Perrine et al. (2009)	Copper-rich material; Precious-metals rich material; Printed Circuit Boards; Ferrous metals; Non-ferrous metals; Aluminium; Plastics; Rubbish and filter dust; Other material												
Meskers, C.E.M. et al. (2009); Salhofer, S. et al. (2009); Schöps, D. et al. (2010)	drives + disks; power supplies; motherboards; contacts, PCB-drives; PCB-power supplies, shredder material from drives; shredder material from power supplies; hazardous components; other fractions/ PCB smashed; shredder material; fines < 12 mm; processors; PCB granulated; NF output mill; Fe-output mill; Fe-output granulator; hazardous components; other fractions	X	X	X									

MFA: Materialflussanalyse, SFA: Stoffflussanalyse

6.6 Behandlungsversuche

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuche zur Vorbehandlung von RePro-Geräte vorgestellt und diskutiert. Auf Grundlage der Analyse der derzeitigen Behandlung von EAG (siehe Kapitel 6.1) und der Literaturrecherche (siehe Kapitel 6.5) wurden mehrere Versuchsreihen im halbtechnischen bis großtechnischen Maßstab geplant und durchgeführt.

Ziel der Versuche war die Bereitstellung experimenteller Daten, aus denen Maßnahmen auf technischer und organisatorischer Ebene abgeleitet werden können, um die Rückgewinnung von RePro-Metallen aus EAG zu optimieren.

Die Versuchsplanung deckte folgende Forderungen ab:

- Versuche mit verschiedenen Verfahrenstypen (manuell, manuell/mechanisch, mechanisch),
- Versuche mit jeweils 1-2 Varianten der genannten Verfahrenstypen,
- Variation der Konzentration ressourcenrelevanter Metalle im Input,
- Variation der Zusammenstellung von EAG bzw. auch ggf. der Zusammenstellung von RePro-Geräten,
- Bestimmung der Outputfraktionen der Behandlung bzw. Behandlungskette, in denen die RePro-Metalle verbleiben,
- Beschreibung der Inputströme auf Geräteebene,
- Dokumentation von eventuellen Vorsortierungen, Demontagen und Entfrachtungen,
- Variation der Inputströme (Änderung der Konzentration bzw. Kombination von RePro-Metallen).

Die wichtigsten Fragestellungen, die mit Hilfe der Versuche beantwortet werden sollten, waren:

- Welche Verlustpfade treten bei den einzelnen Verfahrenstypen in Bezug auf die RePro-Metalle auf?
- Welchen Einfluss hat die Zusammensetzung der Inputmaterialien verschiedener Sammelgruppen auf die Separationsrate/Aufkonzentrierung für die RePro-Metalle (Rückkopplung zur Optimierung der Sammlung von EAG)?
- Welchen Einfluss haben die verschiedenen Aufbereitungstechniken und deren Kombination auf die Rückgewinnungsraten der RePro-Metalle (Vorsortierung nach bestimmten Kriterien, Demontage bestimmter Bauteile, Nutzung verschiedenartiger Schredder- bzw. Zerkleinerungstechnologien, Nutzung verschiedenartiger Trenntechnologien)?

Eine Analyse der derzeitigen Behandlung von EAG und eine Literaturrecherche zu Material- und Stoffflussanalysen der Behandlung von EAG dienten vorab der Klärung, welche Mengenströme in den einzelnen Schritten der Behandlungsketten anfallen und welche Prozesse und Technologien dabei genutzt werden. Anschließend wurden die Versuche schrittweise geplant und durchgeführt, um aufbauend auf den bereits erzielten Ergebnissen das weitere Vorgehen ableiten zu können. Es wurden insgesamt fünf Versuchsreihen konzeptioniert, die unterschiedliche der o. g. Aspekte und Fragestellungen adressierten:

1. Variation der Inputzusammensetzung: Mechanische Behandlung von sortenreinen und gemischten EAG der SG 3 und SG 5 inklusive einer manuellen Abwandlung,
2. Variation der Aufbereitungstechnik: Mechanische und manuelle Behandlung von schnurgebundenen Festnetztelefonen,
3. Mechanische Separation und Anreicherung von Tantal aus Laptop-Unterteilen,
4. Aufbereitung von Feingut aus der mechanischen EAG-Behandlung mit dem Nasstrenntisch,
5. Manuelle Entnahme von Batterien aus EAG der SG 3 und SG 5 und Identifikation von Synergien mit der Entnahme ressourcenrelevanter Komponenten.

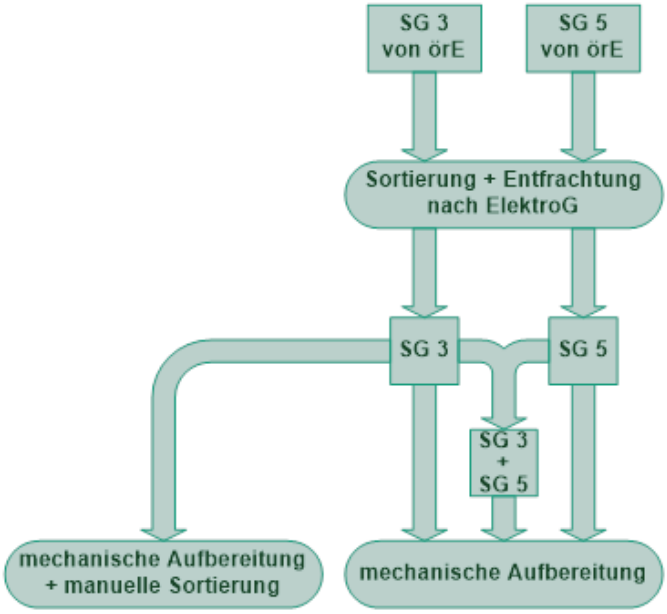
An der Versuchsdurchführung und -auswertung waren die ELPRO Elektronik-Produkt Recycling GmbH (ELPRO GmbH), die TU Hamburg-Harburg (Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft) und die TU Clausthal (Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Lehrstuhl für Rohstoffaufbereitung und Recycling) beteiligt.

6.6.1 Versuch 1: Variation der Inputzusammensetzung – Mechanische Behandlung von sortenreinen und gemischten EAG der SG 3 und SG 5

In dieser Versuchsreihe erfolgte die Behandlung von EAG der SG 3 und SG 5, wie sie regelmäßig von örE bei Recyclingbetrieben angeliefert werden. Alle Versuche wurden bei der ELPRO GmbH durchgeführt. Beide Sammelgruppen wurden nach Vorgabe des ElektroG vorsortiert und von Schad- bzw. Störstoffen befreit. Vor dem Hintergrund der bevorstehenden Novelle des ElektroG wurden bei der Sortierung außerdem die Gerätetypen und -größen per Augenmaß erfasst und in die Kategorien < 50 cm, ca. 50 cm und > 50 cm unterteilt. Es wurden insgesamt ca. 20 t EAG der SG 5 und ca. 10 t EAG der SG 3 für die Behandlungsversuche vorbereitet.

Der Versuchsablauf ist in Abbildung 88 dargestellt. Es wurde ein rein mechanischer Behandlungsversuch mit SG 5 und SG 3 sowie einer Mischung der beiden Sammelgruppen durchgeführt. Bei SG 3 zeigte sich, dass die Vorzerkleinerung und die anschließende automatische Sortierung nicht geeignet sind, um Kunststoffe und Metalle sortenrein zu trennen. Insbesondere die Kunststofffraktion enthielt einen großen Anteil von Platinen, die für das Metallrecycling verloren gewesen wären. Da die Platinen nach der Vorzerkleinerung jedoch weitgehend freiliegen und optisch gut erkennbar sind, wurde ein vierter Versuch mit kombinierter mechanischer Behandlung und manueller Sortierung durchgeführt.

Abbildung 88: Versuchskonzept für die mechanische Behandlung von EAG der SG 3 und SG 5



Quelle: eigene Darstellung

6.6.1.1 Versuchsmaterial

Die angelieferten EAG wurden vor der mechanischen Behandlung manuell von Fehlwürfen, Schad- und Störstoffen befreit. Das Ziel war die Erzeugung von reinen Sammelgruppen nach der Definition des ElektroG und darüber hinaus die Entfernung von prozesstechnisch schädlichen bzw. wertmindernden Begleitstoffen.

Die Ergebnisse der Sortierung und Entfrachtung sind in Tabelle 87 aufgelistet. Die Fehlwurfquote bei SG 5 war sehr hoch, bedingt durch eine große Anzahl an sammelgruppenfremden EAG und einen hohen Anteil nichtelektrischer Altprodukte, z. B. leere Farbeimer und Gartenmöbel.

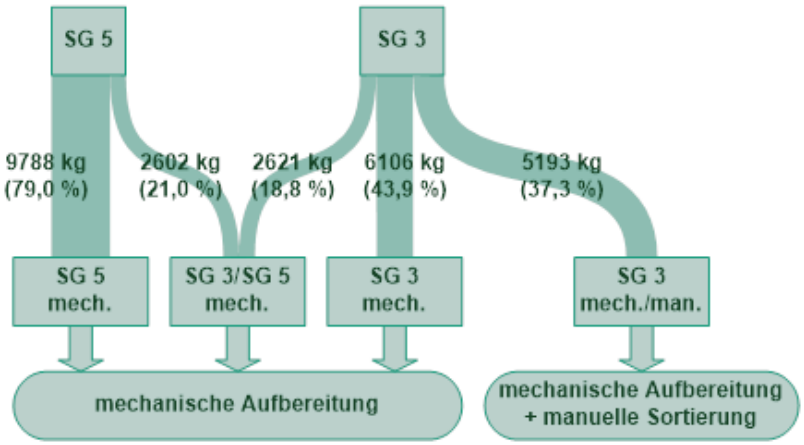
Tabelle 87: Ergebnisse der Sortierung und Entfrachtung von SG 5 und SG 3

Materialien	SG 5, Masse (kg)	SG 3, Masse (kg)
Fehlwürfe	5.378	847
Mischkabel	1.482	503
Kabel mit Goldsteckern	42	25
Batterien	161	31
Mischglas	4	153
Papier/Pappe/Karton	12	
Siedlungsabfälle	202	101
Bildschirme		1.046

Materialien	SG 5, Masse (kg)	SG 3, Masse (kg)
Glaswolle		4
Holz		1.138
Tintenpatronen		42
Tonerkartuschen		40
Summe aussortiertes Material	**7.281**	**3.930**
Versuchsmaterial	12.390	13.920
Gesamtsumme	**19.671**	**17.850**

Das sortierte und entfrachtete Material wurde schließlich für die Versuche gemäß Abbildung 88 aufgeteilt (Abbildung 89). Für jeden Versuch standen mindestens 5 t Material zur Verfügung, so dass ein stationärer Betriebszustand der Anlage und ausreichend Zeit für die Probenahme sichergestellt werden konnte.

Abbildung 89: Zusammenstellung der Versuchsmaterialien aus EAG der SG 3 und SG 5



Quelle: eigene Darstellung

6.6.1.2 Versuchsdurchführung

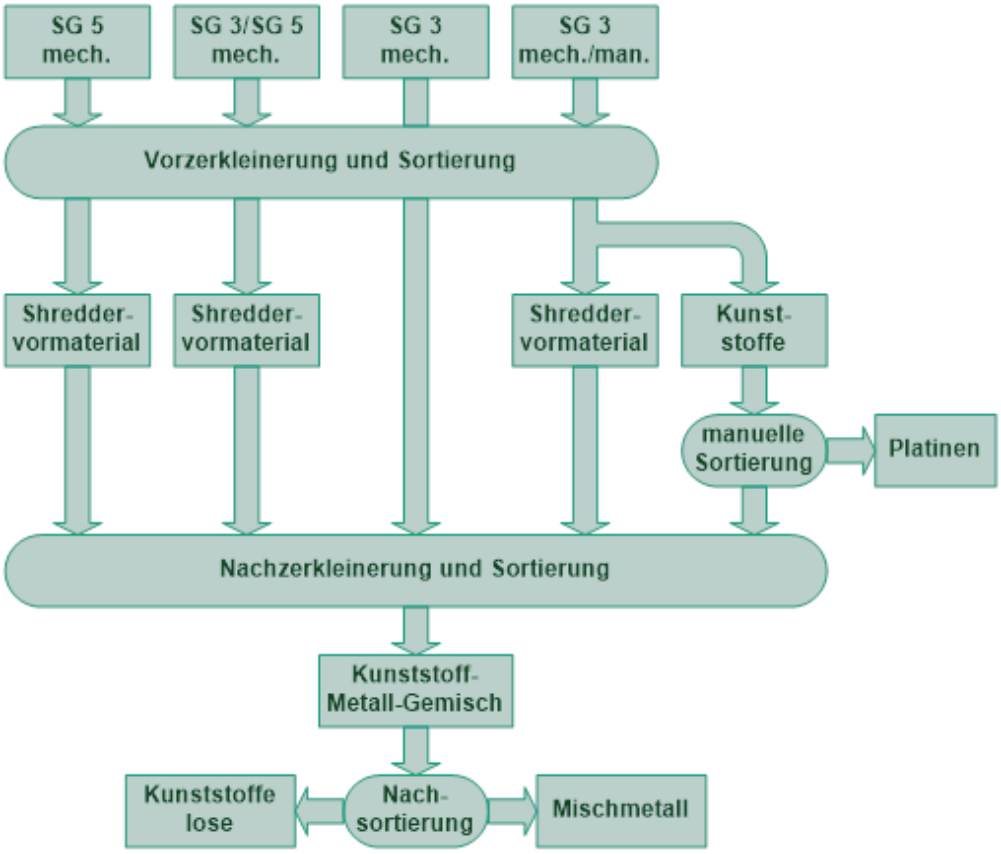
Die mechanische Behandlungsanlage der ELPRO GmbH ist zweistufig (Abbildung 90). In der ersten Stufe erfolgt eine Vorzerkleinerung, die im Wesentlichen dem Aufbrechen der Gerätegehäuse dient. Dabei werden die elektrotechnischen Komponenten freigelegt und großflächige Kunststoffteile erzeugt. Die nachfolgende Sortierung trennt metallhaltige Teile von Kunststoffen. Die Metallfraktion wird als Shreddervormaterial bezeichnet und dient als Input für die Nachzerkleinerung.

Die beiden rein mechanisch behandelten Versuchsmaterialien SG 5 mech. und SG 3/SG 5 mech. durchliefen die vollständige Prozesskette der Vor- und Nachzerkleinerung. Das ebenfalls rein mechanisch behandelte Versuchsmaterial SG 3 mech. wurde hingegen nur in die Nachzerkleinerung gegeben, da die mechanischen Eigenschaften der EAG dieser Sammelgruppe eine Vorzerkleinerung verzichtbar machen und außerdem mit großen Verlusten von Platinen in die Kunststoffraktion zu rechnen wäre. Dieser Effekt wurde bei dem kombinierten Versuch mit dem Versuchsmaterial SG 3 mech./man. genutzt, um

gezielt Platinen nach der Vorzerkleinerung aus dem Stoffstrom der Kunststoffe manuell auszusortieren. Anschließend wurde die manuell sortierte Kunststofffraktion separat in die Nachzerkleinerung gegeben, um verbliebene Bruchstücke von Platinen mit maschinellen Sortierverfahren zu erfassen. Bei allen Versuchen wurde ein Kunststoff-Metall-Gemisch erzeugt, welches zusätzlich in die Fraktionen „Kunststoffe lose“ und Mischmetall getrennt werden kann. Diese Trennung erfolgte exemplarisch für das Kunststoff-Metall-Gemisch aus dem Versuchsmaterial SG 3 mech.

Abbildung 90 zeigt eine Übersicht der Prozesskette und erzeugten Fraktionen. Vollständige Darstellungen der Vor- und Nachzerkleinerung mit allen erzeugten Fraktionen finden sich in Abbildung 91 bzw. Abbildung 92.

Abbildung 90: Übersicht der Prozesskette und erzeugten Fraktionen. Es sind nur die Fraktionen dargestellt, die anschließend weiterverarbeitet werden.

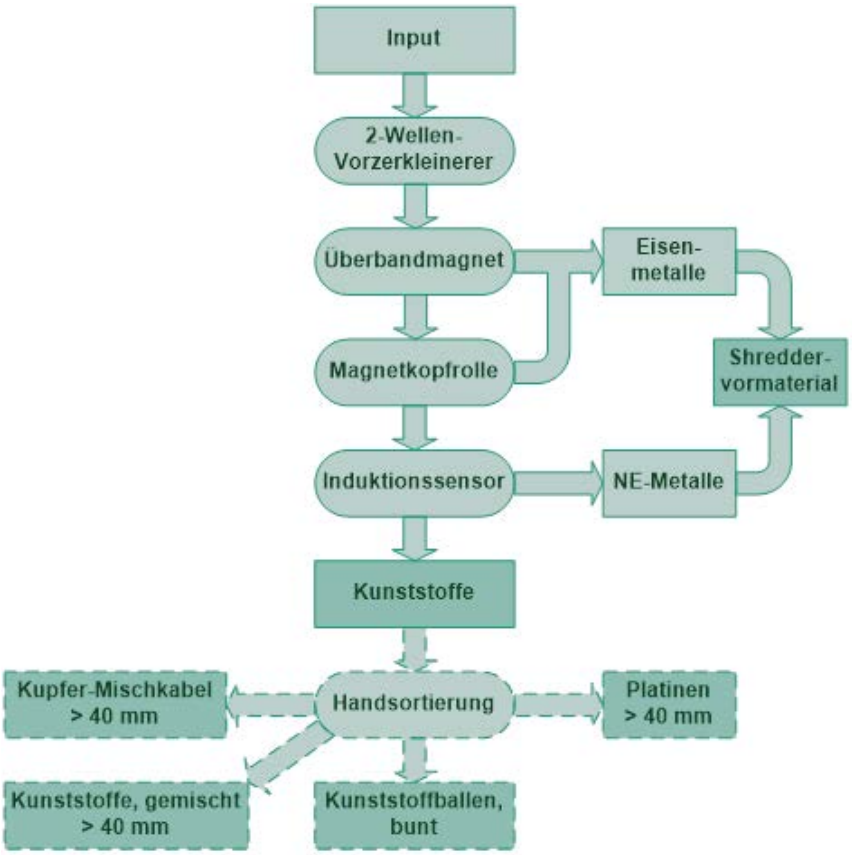


Quelle: eigene Darstellung

Die Einzelschritte der Vorzerkleinerung und Sortierung sind in Abbildung 91 dargestellt. Das Aufbrechen der EAG geschieht mit einem 2-Wellen-Vorzerkleinerer, ohne dass dabei eine definierte Stückgröße erzeugt wird. Es folgt die Abscheidung von Eisenmetallen mit einem Überbandmagnet und einer Magnetkopfrolle am Ende eines Förderbands. Mit Hilfe eines Induktionssensors wird das verbliebene Material in die beiden Fraktionen NE-Metalle und Kunststoffe getrennt. Die NE-Metalle bilden zusammen mit den Eisenmetallen das Shreddervormaterial. Die Kunststoffe werden ggf. manuell nachsortiert,

um dem Stoffstrom z. B. Kupfer-Mischkabel oder Platinen zu entnehmen. Je nach Beschaffenheit kann das Material anschließend als lose Kunststoffe oder in gepresster Form als bunte Kunststoffballen vermarktet werden.

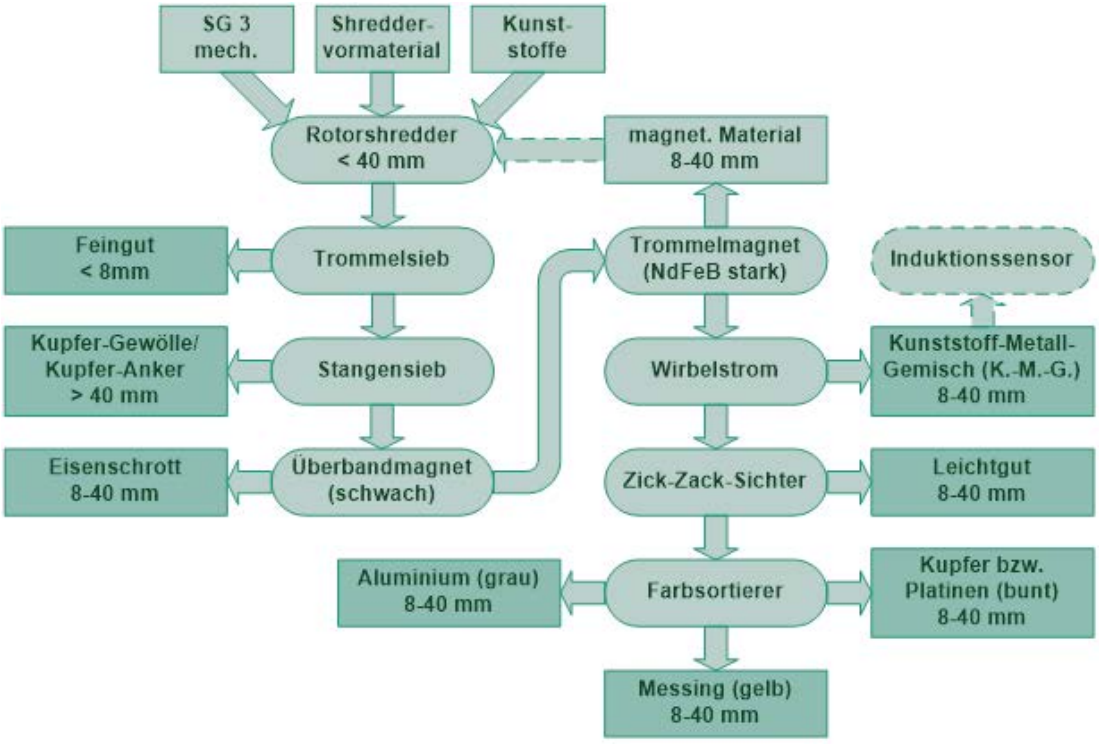
Abbildung 91: Einzelschritte der Vorzerkleinerung mit anschließender Sortierung. Hauptfraktionen sind das Shreddervormaterial und Kunststoffe. Optional ist eine manuelle Nachsortierung der Kunststoffe möglich, um z. B. Platinen zu entnehmen



Quelle: eigene Darstellung

In den Prozess der Nachzerkleinerung gehen je nach Versuch entweder die EAG (SG 3 mech.) oder die zuvor erzeugten Fraktionen Shreddervormaterial bzw. Kunststoffe ein (Abbildung 92). Ein Rotorshredder zerkleinert das aufgegebene Material auf eine nominelle Größe < 40 mm. Um sortierfähiges Material zu erhalten, werden anschließend mit einem Trommelsieb das Feingut < 8 mm und mit einem Stangensieb größere Kupfergewölle und Kupfer-Anker (z. B. aus Spulen und Elektromotoren) abgetrennt. Es folgen weitere Sortierschritte, in denen mit spezifischen Metallen angereicherte und marktfähige Fraktionen erzeugt werden.

Abbildung 92: Einzelschritte der Nachzerkleinerung mit anschließender Sortierung. Es werden bis zu acht verschiedene Fraktionen erzeugt, die zur direkten Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen oder zur weiteren Aufbereitung vermarktet werden (Tabelle 88)



Quelle: eigene Darstellung

Das Material aus der Magnetscheidung besteht zum Großteil aus nicht vollständig aufgeschlossenen Kunststoff-Metall-Verbunden und wird zumeist noch einmal in den Rotorschredder gegeben. Das Kunststoff-Metall-Gemisch aus der Wirbelstromscheidung enthält häufig noch zu viel Kunststoff und wird deshalb über den Induktionssensor der Vorzerkleinerung gefahren, um die zwei marktfähigen Fraktionen Kunststoffe lose und Mischmetall zu erzeugen.

Nicht alle Fraktionen sind bereits für die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen geeignet und müssen an spezialisierte Aufbereiter abgegeben werden. Besonders gewinnträchtig sind die Fraktionen, welche direkt an Metallhütten verkauft werden können. Details zum Verbleib der Fraktionen sind in Tabelle 88 aufgelistet.

Tabelle 88: Verbleib der Fraktionen aus der Nachzerkleinerung und Sortierung in nachfolgenden Prozessen

Fraktion	Verbleib
Schreddervormaterial	Nachzerkleinerung
Kunststoffballen, bunt	Vermarktung zur weiteren Aufbereitung
Kunststoffe, gemischt > 40 mm	Vermarktung zur thermischen Verwertung

Fraktion	Verbleib
Kupfer-Mischkabel > 40 mm	Vermarktung zur weiteren Aufbereitung
Feingut < 8 mm	Vermarktung zur weiteren Aufbereitung
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Cu-Hütten
Eisenschrott 8-40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Fe-Hütten
Magnetisierbares Material 8-40 mm	Rückführung in Nachzerkleinerung
K.-M.-G. 8-40 mm	Nachsortierung mit Induktionssensor
K.-M.-G. 8-40 mm - Kunststoffe lose 8-40 mm	Vermarktung zur weiteren Aufbereitung
K.-M.-G. 8-40 mm - Mischmetall 8-40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Cu-Hütten
Leichtgut 8-40 mm	Zuordnung zu anderen Fraktion (je nach Input)
Aluminium 8-40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Al-Hütten
Messing 8-40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Messingwerken
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	Vermarktung zur Rückgewinnung in Cu-Hütten

6.6.1.3 Probenahme und chemische Analyse

Die Probenahme für die Durchführung der chemischen Analysen orientierte sich an der Richtlinie LAGA PN98[61], die als Handlungsanweisung für die Gewinnung von Teilmengen zur Ermittlung charakteristischer Merkmale von Abfällen oder abgelagerten Materialien dient. Für die Probenahme ist das Volumen der Grundmenge sowie maximale Korngröße bzw. Stückigkeit des Materials entscheidend. Bei einem Volumen < 30 m^3 sind mindestens 8 Einzelproben erforderlich, aus denen 2 Misch- bzw. Laborproben die zu erstellen sind. Die maximale Stückigkeit liegt bei ≤ 50 mm, daraus ergeben sich Mindestvolumina von 2 l für die Einzelproben und von 4 l für die Laborproben. In Abweichung zu dieser Vorschrift wurden die Einzelproben jeweils zu einer Mischprobe vereint, da die chemische Analyse von zwei Laborproben nicht vorgesehen war und so die Repräsentativität über den Versuchszeitraum verbessert wurde.

Die Probennahme erfolgte in festen Intervallen über den Versuchszeitraum. Die erste Probenahme erfolgte nach Erreichen eines stationären Betriebszustandes, welcher ca. 30 min nach dem Anfahren der Anlage erreicht wird. Die Proben wurden nach Möglichkeit direkt aus dem Materialstrom am Bandabwurf der jeweiligen Fraktion gezogen. Sämtliche Fraktionen der Nachzerkleinerung, die im Sinne des Prozessschemas als Endprodukte zu bezeichnen sind, wurden beprobt (vgl. Abbildung 92, dunkelgrüne Felder). Zusätzlich wurde der Staub beprobt, indem eine handelsübliche Atemschutzmaske über ein Absaugrohr gezogen und mit Klebeband befestigt wurde.

[61] LAGA PN 98 Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32, Stand: Dezember 2001

Im Labor wurden die Mischproben zunächst verjüngt und anschließend manuell sortiert in die Fraktionen grobe Metallstücke (Fe, Al, Cu und Messing), Elkos und Restmaterial. Der an den groben Metallstücken und Elkos anhaftende Staub wurde abgespült und anschließend getrocknet. Das Restmaterial wurde in vier Stufen bis auf eine Korngröße < 0,5 mm zerkleinert und danach erneut verjüngt. Der getrocknete Staub, das zerkleinerte und verjüngte Restmaterial sowie die Atemschutzmaske (ohne Ventil und Gummizüge) wurden dann separat bei 550 °C geglüht und unabhängig voneinander analysiert.

Die Analyseproben wurden zunächst in einem Screening mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse (EDRFA) untersucht, um einen qualitativen Überblick der Zusammensetzung zu erhalten. Anschließend erfolgte die nasschemische Extraktion der Metalle und eine erneute Messung des Rückstands mit EDRFA zur Überprüfung auf ungelöste Metallreste. Die Metallkonzentrationen im Filtrat wurden schließlich quantitativ massenspektrometrisch mittels ICP-OES und ICP-MS bestimmt. Von den zwölf RePro-Metallen wurden Sb und Be nicht berücksichtigt.

6.6.1.4 Ergebnisse

Ausgehend von den während der Versuche ermittelten Massen der einzelnen Fraktionen und den anschließend im Labor gemessenen Stoffkonzentrationen erfolgte die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse. Zusätzlich wurden aus den absoluten Massen $m_i(x)$ eines ressourcenrelevanten Metalls x in der Fraktion i die Transferkoeffizienten $T_i(x)$ berechnet, die die relative Verteilung über alle n Fraktionen angeben:

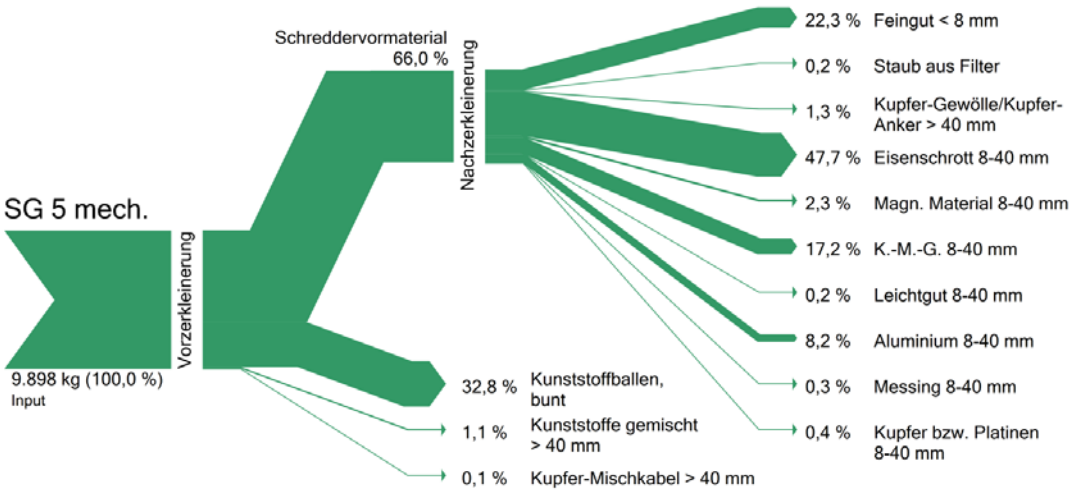
$$T_i(x) = \frac{m_i(x)}{\sum_{i=1}^{n} m_i(x)} \cdot 100\ \%$$

Die chemischen Analysen konnten nicht für alle Metalle quantitative Ergebnisse liefern. Die Konzentrationen von Co, In und Ta lagen in vielen Fraktionen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Da somit keine Massenbilanzen erstellt werden konnten, wurden diese Metalle nicht weiter berücksichtigt.

6.6.1.5 Versuch SG 5 mech.

Die Materialflüsse durch die Prozesse der Vor- und Nachzerkleinerung sind in Abbildung 93 gezeigt. Nach der Vorzerkleinerung wurden mit Hilfe der Fe- und NE-Metallabscheidung (vgl. Abbildung 91) rund zwei Drittel des Inputs als Schreddervormaterial aussortiert. Das restliche Material bestand fast ausschließlich aus bunten Kunststoffen, die zu Ballen verpresst wurden. Die im Anschluss an die Nachzerkleinerung durchgeführten Sortierprozesse (vgl. Abbildung 92) erzeugten vier Hauptfraktionen mit einem Gesamtanteil von ca. 95 %: Eisenschrott, Feingut, Kunststoff-Metall-Gemisch (K.-M.-G.) und Aluminium.

Abbildung 93: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 5 mech.) und Nachzerkleinerung (Shreddervormaterial)



Quelle: eigene Darstellung

Der Hauptaustrag der RePro- Metalle erfolgte in die Fraktionen Feingut und K.-M.-G. (Tabelle 89). Für diese beiden Fraktionen summieren sich die Transferkoeffizienten zu Werten von 79,8-97,2 %. Für Au sind Verschleppungen von 4,3 % und 4,6 % in die Fraktionen Eisenschrott bzw. Leichtgut zu verzeichnen. Eine Rückgewinnung von Au aus diesen Fraktionen ist aufgrund der ungeeigneten Verwertungswege und der niedrigen Konzentrationen nicht möglich. Der Austrag von Au (10,1 %) und Pd (4,8 %) in die Fraktion Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker vernachlässigbar, da beide Edelmetalle bei der Verwertung zurückgewonnen werden können.

Tabelle 89: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 5 mech.), < BG: unterhalb der Bestimmungsgrenze

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	41,0	51,3	45,0	58,2	36,1	61,1	75,1
Staub aus Filter	0,6	0,7	< 0,1	0,3	0,4	< BG	1,4
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	10,1	1,6	4,8	1,7	1,1	1,5	1,5
Eisenschrott 8-40 mm	4,3	1,8	2,6	0,5	1,7	1,0	1,5
K.-M.-G. 8-40 mm	38,8	43,7	46,9	37,0	59,8	36,1	20,1
Leichtgut 8-40 mm	4,6	0,4	0,2	1,0	0,1	0,2	0,3
Aluminium 8-40 mm	0,4	0,5	0,5	1,2	0,7	0,1	0,1
Messing 8-40 mm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	< BG	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
absolute Massen (mg)	**823**	**41.499**	**47.744**	**7.198**	**1.255.310**	**3.540**	**47.250**

Für eine gute Marktfähigkeit der Fraktionen ist die Konzentration der wertgebenden Metalle entscheidend (Tabelle 90). Für den Input ergeben sich aus einer Berechnung auf Grundlage der im Output gemessenen Mengen der RePro-Metalle zunächst sehr niedrige Ausgangskonzentrationen. Trotzdem war es möglich, mit Ausnahme von Au und Y eine Anreicherung in spezifischen Fraktionen zu erzielen. Auffällig ist, dass vergleichsweise hohe Konzentrationen an Silber, Zinn und Neodym in der massenmäßig unbedeutenden Fraktion Staub aus Filter gemessen wurden.

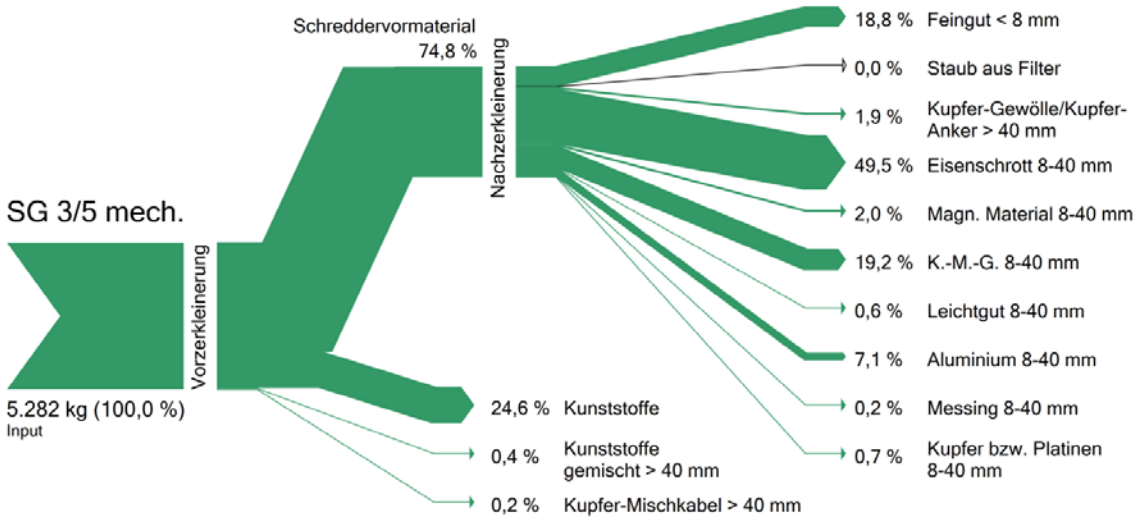
Tabelle 90: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 5 mech.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	< 1	15	15	3	311	1	24
Staub aus Filter	1	28	2	2	514	< BG	70
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	1	8	27	1	170	1	9
Eisenschrott 8-40 mm	< 1	< 1	< 1	< 1	7	< 1	< 1
K.-M.-G. 8-40 mm	< 1	16	20	2	668	1	8
Leichtgut 8-40 mm	3	13	7	6	132	1	12
Aluminium 8-40 mm	< 1	< 1	< 1	< 1	15	< 1	< 1
Messing 8-40 mm	< 1	1	< 1	< 1	27	< 1	< 1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	< BG	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Input (berechnet)	**< 1**	**4**	**5**	**1**	**127**	**< 1**	**5**

6.6.1.6 Versuch SG 3/SG 5 mech.

Die Materialflüsse zeigen ein sehr ähnliches Verteilungsmuster wie im vorangegangen Versuch mit SG 5 (Abbildung 94). Der Kunststoffanteil nach der Vorzerkleinerung liegt etwas niedriger bei rund einem Viertel. Ca. 95 % des Shreddervormaterials verteilten sich wie zuvor auf die vier gleichen Hauptfraktionen Eisenschrott, K.-M.-G., Feingut und Aluminium.

Abbildung 94: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 3/SG 5 mech.) und Nachzerkleinerung (Schreddervormaterial)



Quelle: eigene Darstellung

Das gleiche Bild zeigt sich auch bei den Transferkoeffizienten (Tabelle 91). Der Hauptanteil der RePro-Metalle wurde in die Fraktionen Feingut und K.-M.-G. ausgetragen, die summierten Massen liegen bei hohen 92,7-98,6 % des im Ausgang gemessenen RePro-Metallgehalts. In die beiden anderen Hauptfraktionen Eisenschrott und Aluminium findet eine geringe Verschleppung der RePro-Metalle von wenigen Prozent statt. Der höhere Anteil von Platinen in SG 3 führt dazu, dass über die Farbsortierung auch ein geringer Austrag in die entsprechende Fraktion Kupfer bzw. Platinen erfolgt.

Tabelle 91: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3/SG 5 mech.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	24,6	45,7	42,9	60,0	56,8	61,0	89,1
Staub aus Filter							
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 0,1	0,4	3,9	1,0	0,8	0,4	0,5
Eisenschrott 8-40 mm	< BG	0,1	2,3	0,2	1,6	0,5	0,2
K.-M.-G. 8-40 mm	69,8	49,5	47,0	32,7	38,0	34,4	9,5
Leichtgut 8-40 mm	1,6	2,1	1,5	3,2	1,4	1,2	0,4
Aluminium 8-40 mm	3,0	1,1	1,5	1,9	1,1	1,6	0,1
Messing 8-40 mm	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,1	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	0,8	1,0	0,8	0,9	0,3	0,8	0,1
absolute Massen (mg)	**32.334**	**204.960**	**26.941**	**5.727**	**955.736**	**3.087**	**112.668**

In der Mischung aus SG 3 und SG 5 liegen bereits die Konzentrationen im Input höher oder mindestens gleichauf mit der reinen SG 5. Hohe Konzentrationen werden nicht nur in den beiden Hauptfraktionen Feingut und K.-M.-G. gemessen, sondern auch in den beiden Fraktionen Staub aus Filter und Leichtgut, die aufgrund der geringen Massenanteile jedoch nur eine geringe Metallfracht tragen.

Tabelle 92: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 3/SG 5 mech.)

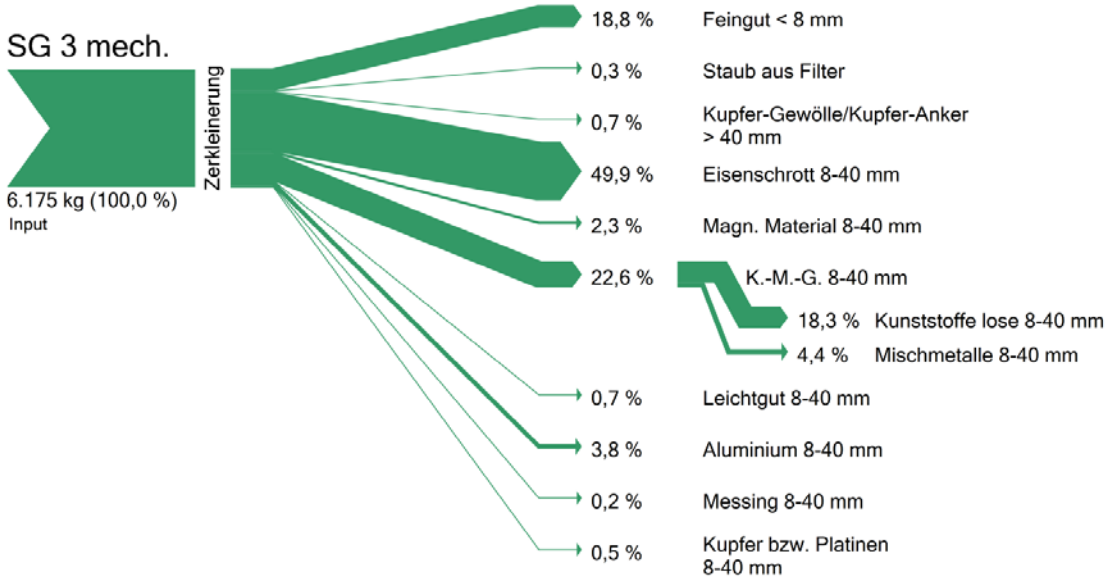
Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	11	126	16	5	730	3	135
Staub aus Filter	2	44	3	3	767	< BG	285
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 1	12	14	1	104	< 1	8
Eisenschrott 8-40 mm	< BG	< 1	< 1	< 1	8	< 1	< 1
K.-M.-G. 8-40 mm	30	134	17	2	479	1	14
Leichtgut 8-40 mm	22	179	17	8	560	2	18
Aluminium 8-40 mm	3	8	1	< 1	37	< 1	1
Messing 8-40 mm	5	12	2	1	25	< 1	1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	9	74	8	2	113	1	5
Input (berechnet)	**6**	**39**	**5**	**1**	**181**	**1**	**21**

6.6.1.7 Versuch SG 3 mech.

Die reine SG 3 wurde direkt in den Rotorshredder gegeben und durchlief nur das Prozessschema der Nachzerkleinerung (vgl. Abbildung 92). Zusätzlich wurde hier die Fraktion K.-M.-G. mit Hilfe eines Induktionssensors in die beiden Fraktionen Kunststoffe lose und Mischmetall getrennt, um eine weitere Anreicherung der ressourcenrelevanten Metalle zu erzielen (Abbildung 95).

Gemessen an den deutlichen Unterschieden beim Input ändern sich die Materialflüsse nur wenig. Eisenschrott, K.-M.-G. und Feingut bringen es zusammen auf einen Anteil von 91,3 %, der Anteil von Aluminium fällt mit 3,8 % im Vergleich etwas ab. Die Nachsortierung der Fraktion K.-M.-G. ergab ein Verhältnis der Kunststoffe lose zu den Mischmetallen von ca. 4:1.

Abbildung 95: Materialflussdiagramm für die Zerkleinerung (SG 3 mech.) und Nachsortierung (K.-M.-G. 8-40 mm)



Quelle: eigene Darstellung

Bei den Transferkoeffizienten bietet sich das bereits vertraute Bild mit den Fraktionen Feingut und K.-M.-G. als Hauptaustragspfade (81,4-91,4 %), hier allerdings mit Schwerpunkt auf dem Feingut (Tabelle 93). Es sind merkliche Verschleppungen der Edelmetalle Ag und Pd, aber auch von Sn in die Fraktion Eisenschrott zu erkennen. Interessant ist die Verteilung der Metalle über die beiden nachträglich erzeugten Fraktionen Mischmetall und Kunststoffe lose. Der gewünschte Austrag in die Metallfraktion gelingt zwar für die Edelmetalle Au, Ag und Pd mit gutem bis sehr gutem Ergebnis, dagegen ist die Verteilung von Ga, Sn, Y und Nd unspezifisch oder sogar in Richtung Kunststoffe verschoben.

Tabelle 93: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	76,1	70,8	58,4	69,8	78,3	80,8	87,4
Staub aus Filter	0,4	1,5	1	3,2	2,7	4,7	7,4
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 0,1	0,2	7,2	< 0,1	0,5	0,2	0,1
Eisenschrott 8-40 mm	2	5,2	5,1	2,4	4,9	1,3	0,7
K.-M.-G. 8-40 mm Mischmetall	14,2	16	16,9	11	6	3,7	0,8
K.-M.-G. 8-40 mm Kunststoffe lose	0,7	2,3	6,1	8,2	5,2	5,2	3,2
Leichtgut 8-40 mm	3,8	2,2	2,8	3,2	1,7	1	0,2

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Aluminium 8-40 mm	0,1	0,7	0,8	0,6	0,2	0,2	0,1
Messing 8-40 mm	< 0,1	0,2	0,2	0,2	< 0,1	0,1	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	2,6	1	1,5	1,5	0,4	3	0,1
absolute Massen (mg)	**33.753**	**290.967**	**27.414**	**6.813**	**2.217.188**	**8.640**	**193.609**

Betrachtet man die Konzentrationen in den einzelnen Fraktionen, lassen sich für alle Metalle Anreicherungen im Feingut und im Filterstaub feststellen (Tabelle 94). Den höchsten Faktor erreicht Nd im Filterstaub mit einer Aufkonzentration um den Faktor 23. Auch in den Fraktionen Mischmetall, Leichtgut und Kupfer bzw. Platinen gelingt eine Anreicherung einzelner Metalle.

Tabelle 94: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle (SG 3 mech.)

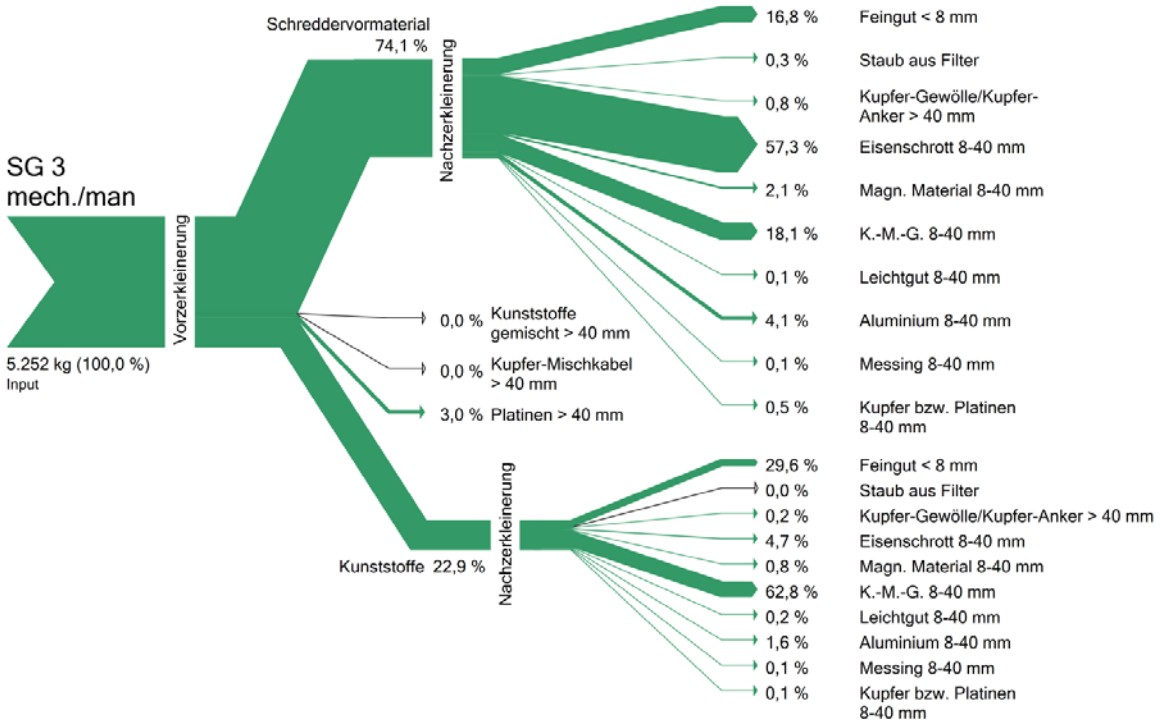
Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	22	177	14	4	1493	6	146
Staub aus Filter	7	218	14	11	3011	20	714
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 1	12	45	< BG	264	< 1	6
Eisenschrott 8-40 mm	< 1	5	< 1	< 1	35	< 1	< 1
K.-M.-G. 8-40 mm Mischmetall	18	173	17	3	495	1	6
K.-M.-G. 8-40 mm Kunststoffe lose	< 1	6	1	< 1	102	< 1	5
Leichtgut 8-40 mm	28	136	17	5	838	2	8
Aluminium 8-40 mm	< 1	8	1	< 1	16	< 1	< 1
Messing 8-40 mm	1	45	4	1	70	< 1	3
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	28	96	13	3	252	8	6
Input (berechnet)	**5**	**47**	**4**	**1**	**359**	**1**	**31**

6.6.1.8 Versuch SG 3 mech./man.

Bei dieser Verfahrensabwandlung wurde die reine SG 3 zunächst in die Vorzerkleinerung gegeben, um einen groben Aufschluss der EAG und damit eine Freisetzung einzelner Komponenten zu bewirken. Rund drei Viertel des Inputs gelangten bei der Sortierung in das Shreddervormaterial, aus dem restlichen Stoffstrom konnten außerdem 3,0 % größere Platinen manuell entnommen werden. Neben dem Shreddervormaterial wurden außerdem die Kunststoffe, die noch einen hohen Anteil an Platinenstücken enthielten, in die Nachzerkleinerung gegeben.

Das nachzerkleinerte Shreddervormaterial verteilte sich hauptsächlich auf die Fraktionen Eisenschrott, K.-M.-G. und Feingut mit zusammen 92,2 %. Die noch Shreddervormaterial enthaltenen Kunststoffe verteilten sich zu 92,4 % auf die beiden Fraktionen K.-M.-G. und Feingut.

Abbildung 96: Materialflussdiagramm für die Vorzerkleinerung (SG 3 mech.) und Nachzerkleinerung (Schreddervormaterial und Kunststoffe)



Quelle: eigene Darstellung

Die größte Metallfracht wird mit dem Schreddervormaterial in die Nachzerkleinerung getragen (Tabelle 95). Trotz des geringen Massenanteils von nur 3,0 % finden sich aber auch in den Platinen beträchtliche Mengen an ressourcenrelevanten Metallen. Die Verteilung der RePro-Metalle auf die einzelnen Fraktionen der Behandlung ist in Tabelle 95 bis Tabelle 97 dargestellt.

Tabelle 95: Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Vorzerkleinerung

	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Platinen > 40 mm	23,0	8,2	12,3	8,7	15,7	27,4	3,0
Shreddervormaterial	39,3	57,9	71,7	61,3	64,1	31,2	61,6
Kunststoffe	37,7	33,9	16,0	30,0	20,2	41,4	35,4
absolute Massen (mg)	34.381	453.771	53.174	7.714	1.463.778	6.430	171.097

Tabelle 96 Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Nachzerkleinerung des Schreddervormaterials

	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	66,1	38,3	38,8	56,3	46,2	36,6	67,8
Staub aus Filter	1,0	1,2	0,5	4,8	4,4	22,9	17,7
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 0,1	0,1	2,1	0,2	2,9	0,3	0,2
Eisenschrott 8-40 mm	4,7	0,4	5,0	1,2	8,5	1,8	3,2
K.-M.-G. 8-40 mm	26,9	58,3	52,9	34,9	37,2	36,3	10,8
Leichtgut 8-40 mm	0,3	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,1
Aluminium 8-40 mm	< 0,1	0,2	0,1	0,8	0,2	0,1	< 0,1
Messing 8-40 mm	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	0,8	1,1	0,6	1,4	0,5	1,6	0,1
absolute Massen (mg)	13.517	262.544	38.150	4.725	938.740	2.004	105.408

Tabelle 97 Transferkoeffizienten (%) der RePro-Metalle und deren absolute Massen (SG 3 mech./man.): Nachzerkleinerung der Kunststoffe

	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	81,5	36,4	66,4	47,4	49,8	54,9	83,2
Staub aus Filter	–	–	–	–	–	–	–
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	0,2	0,2	1,3	0,1	0,4	0,1	0,2
Eisenschrott 8-40 mm	< 0,1	< 0,1	0,9	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
K.-M.-G. 8-40 mm	17,9	63,1	30,7	51,7	48,5	44,9	16,5
Leichtgut 8-40 mm	0,1	0,2	0,2	0,4	0,9	< 0,1	< 0,1
Aluminium 8-40 mm	0,2	0,1	0,4	0,4	0,4	< 0,1	< 0,1
Messing 8-40 mm	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
absolute Massen (mg)	12.962	154.052	8.509	2.315	295.147	2.665	60.534

62 Prozent der nach der Vorzerkleinerung bestimmten RePro-Metallmasse findet sich nach der Nachzerkleinerung in den Outputfraktionen wieder, die aus dem Schreddervormaterial gewonnen wurden. Die Outputfraktionen der Kunststofffraktion enthalten 24 Prozent des nach der Vorzerkleinerung Bestimmten RePro-Metall-Gehaltes.

Die Nachzerkleinerung des Shreddervormaterials ergibt das bereits gewohnte Bild mit den Fraktionen Feingut und K.-M.-G. als den Hauptsenken für die RePro-Metalle (72,9-96,6 %). Bei Y und Nd sind allerdings starke Verschleppungen in den Filterstaub zu beobachten (22,9 % bzw. 17,7 %) und auch der Eisenschrott enthält einige Prozent der Gesamtmassen von Au, Pd und Sn.

Die Nachzerkleinerung der Kunststoffe ergab lediglich zwei Fraktionen mit nennenswerten RePro-Metallgehalten: Feingut und K.-M.-G. In diese beiden Fraktionen wurden praktisch alle RePro-Metalle, die im Output der Nachzerkleinerung der Kunststofffraktion bestimmt wurden, transferiert (97,1-99,7 %). Angesichts der bereits nach der Vorzerkleinerung durchgeführten Metallabtrennung ist dieses Ergebnis nicht verwunderlich.

Durch die Entnahme der Platinen nach der Vorzerkleinerung gelingt eine Anreicherung der RePro-Metalle mit Ausnahme von Nd (vgl. Tabelle 98). Die Konzentrationen im Shreddervormaterial und in den Kunststoffen liegen dagegen nur etwas über oder unter dem Niveau des Inputs.

Die aus der Nachzerkleinerung des Shreddervormaterials gewonnene Hauptfraktion Eisenschrott enthält außer Sn nur sehr niedrige Konzentrationen der RePro-Metalle. In den beiden anderen Hauptfraktionen K.-M.-G. und Feingut gibt es signifikante Anreicherungen, im Schnitt werden die höchsten Konzentrationen jedoch im Filterstaub erreicht.

Durch die Nachzerkleinerung der Kunststoffe lässt sich keine ausgeprägte Anreicherung in den beiden Hauptfraktionen erzielen. Im Feingut liegen die Konzentrationen etwas höher, im K.-M.-G. dagegen eher niedriger als im Ausgangsmaterial. Auch hier zeigen sich bei einigen Metallen die höchsten Konzentrationen im Filterstaub.

Tabelle 98: Konzentrationen der RePro-Metalle nach Vorzerkleinerung des Inputs (SG 3 mech./man.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Platinen > 40 mm	49	232	41	4	1437	11	32
Shreddervormaterial (berechnet)	3	67	10	1	241	1	27
Kunststoffe (berechnet)	11	128	7	2	246	2	50
Input (berechnet)	7	86	10	1	279	1	33

Tabelle 99 Konzentrationen der RePro-Metalle nach Nachzerkleinerung des Schredd-ervormaterials (SG 3 mech./man.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	14	154	23	4	662	1	109
Staub aus Filter	14	322	18	23	4165	46	1870
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	< 1	10	24	< 1	824	< 1	6
Eisenschrott 8-40 mm	< 1	< 1	1	< 1	36	< 1	1
K.-M.-G. 8-40 mm	5	218	29	2	497	1	16
Leichtgut 8-40 mm	20	256	13	9	312	1	68
Aluminium 8-40 mm	< 1	4	< 1	< 1	11	< 1	< 1
Messing 8-40 mm	12	52	6	1	148	1	28
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	5	150	12	3	228	2	6

Tabelle 100 Konzentrationen der RePro-Metalle nach Nachzerkleinerung der Kunststofffraktion (SG 3 mech./man.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	30	158	16	3	414	4	142
Staub aus Filter	4	115	6	5	1061	36	425
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	13	118	55	1	562	2	60
Eisenschrott 8-40 mm	< 1	< 1	1	< 1	2	< 1	< 1
K.-M.-G. 8-40 mm	3	129	3	2	190	2	13
Leichtgut 8-40 mm	6	123	8	5	1272	1	9
Aluminium 8-40 mm	1	11	2	< 1	59	< 1	1
Messing 8-40 mm	19	13	1	< 1	111	< 1	1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	2	52	6	1	146	1	4

6.6.1.9 Diskussion

In dieser Versuchsreihe wurden unterschiedlich zusammengesetzte Mischungen von EAG mit einer Verfahrenskette von mechanischen Aufbereitungsprozessen verarbeitet, um den Einfluss der Zusammensetzung des Inputs auf das Aufbereitungsergebnis zu untersuchen. Im Fall der EAG aus SG 3 wurde außerdem eine Variante des Verfahrens erprobt, die einen zusätzlichen manuellen Sortierschritt umfasste. Die insgesamt in den Outputfraktionen gemessenen Konzentrationen der einzelnen RePro-Metalle ist vergleichend für die unterschiedlichen Inputströme in Tabelle 101 dargestellt.

Tabelle 101: Konzentrationen im Input der verschiedenen Versuche mit EAG der SG 3 und SG 5 (Angaben in mg/kg)

Versuche	Massenverhältnisse SG 3 : SG 5	Au	Ag	Pd	Ga	Sn	Y	Nd
Input SG 5 mech. (berechnet)	0:100	< 1	4	5	1	127	< 1	5
Input SG 3/SG 5 mech. (berechnet)	50:50	6	39	5	1	181	1	21
Input SG 3 mech. (berechnet)	100:0	5	47	4	1	359	1	31
Input SG 3 mech./man. (berechnet)	100:0	7	86	10	1	279	1	33

Für die Abweichungen von den Idealwerten gibt es mehrere Erklärungsmöglichkeiten:

- Heterogenitäten auf Geräteebene, die keine Zusammenstellung von idealem Input erlauben
- Keine repräsentative Probenahme und -aufbereitung
- Nicht erfasste Verluste in unbeprobten Fraktionen

Die genaue Ursache lässt sich nachträglich nicht mehr ermitteln, es werden aber mit hoher Wahrscheinlichkeit alle der genannten Punkte einen mehr oder weniger großen Einfluss gehabt haben. Nichtsdestoweniger ist eine Vergleichbarkeit von relativen Kenngrößen wie z. B. den Transferkoeffizienten gegeben. Bei den Konzentrationen sollten demnach aber nicht die absoluten Werte, sondern die erzielten Anreicherungen in Bezug auf die Konzentrationen im Input verglichen werden.

Für eine absolute Vergleichbarkeit der Ergebnisse wäre ein absolut homogenes Ausgangsmaterial nötig gewesen, um ideale Gerätemischungen als Input für die Versuche herstellen zu können. Ein Vergleich der berechneten Konzentrationen im Input zeigt, dass die Mischungen der EAG nicht homogen und ideal waren (Tabelle 101). Zum einen müssten die Konzentrationen in SG 3 durchweg höher sein als in SG 5, und zum anderen müssten die Konzentrationen in der Mischung SG 3/SG 5 dem Mittelwert von SG 3 und SG 5 entsprechen. Auch der Input für die beiden Versuche mit SG 3 müsste unter idealen Bedingungen identisch sein, was für Ag, Pd und Sn nicht der Fall ist.

Der Vergleich der insgesamt bestimmten Outputmassen der RePro-Metalle nach der Vorzerkleinerung und der Nachzerkleinerung der beiden Outputfraktionen der Vorzerkleinerung zeigt, dass nur 87 Prozent der zuvor bestimmten Metallmasse in den Outputfraktionen der Nachzerkleinerung wiedergefunden wird. Dies zeigt, dass es nicht erfasste Verluste gibt, welche nicht im Versuch erfasst wurden.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der unterschiedlichen Versuche mit EAG der SG 3 und SG 5 ist in Tabelle 102 dargestellt. Für die kumulierten Verteilungen wurden die Massen der einzelnen ressourcenrelevanten Metalle für jede Fraktion summiert und vergleichend gegenübergestellt. Es zeigt sich hier noch mal deutlich, dass unabhängig von der Zusammensetzung des Inputs der Hauptaustrag in die Fraktionen Feingut und K.-M.-G. erfolgt.

Tabelle 102: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für die verschiedenen Versuche mit EAG der SG 3 und SG 5, angegeben sind die Massenanteile (%) der RePro-Metalle

	SG 5 mech. Shredder-vormaterial	SG 3/SG 5 mech. Shredder-vormaterial	SG 3 mech.	SG 3 mech./man. Shredder-vormaterial	SG 3 mech./man. Kunststoffe
Feingut < 8 mm	41,8	62,6	60,0	43,9	55,0
Staub aus Filter	0,5		2,5	8,1	
Kupfer-Gewölle/ Kupfer-Anker > 40 mm	1,2	0,7	0,3	2,0	0,3
Eisenschrott 8-40 mm	1,7	1,1	2,7	6,0	< 0,1
K.-M.-G. 8-40 mm	54,0	33,1	32,9	39,2	43,9
Leichtgut 8-40 mm	0,2	1,2	1,1	0,1	0,5
Aluminium 8-40 mm	0,6	0,9	0,1	0,2	0,2
Messing 8-40 mm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	< 0,1	0,4	0,3	0,6	< 0,1

Das genutzte Verfahren der mechanischen Aufbereitung ist also sehr robust gegenüber variierendem Input und lenkt die Stoffströme der ressourcenrelevanten Metalle in zwei Fraktionen, die allerdings in dieser Form noch nicht unmittelbar als Input für Rückgewinnungsprozesse geeignet sind. Bei beiden Fraktionen stören die hohen Kunststoffanteile, die nicht nur die Metallkonzentrationen verdünnen sondern sich auch ungünstig auf den Einsatz in pyrometallurgischen Prozessen auswirken.

Die gröbere Fraktion K.-M.-G. mit einem Kornband von 8-40 mm ließ sich mit Hilfe des Induktionssensors in die Fraktionen Mischmetall und Kunststoffe lose sortieren. Das erzielte Ergebnis ist sehr gut, die Zielfraktion Mischmetall zeichnet sich durch hohe Transferkoeffizienten und einen niedrigen Massenanteil aus. Die Verluste in die Fraktion Kunststoffe lose können als geringfügig eingestuft werden. Das so gewonnene Material eignet sich für den direkten Einsatz in Kupferhütten.

Für die Weiterverarbeitung des Feinguts stand bei der ELPRO GmbH kein geeignetes Verfahren zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden weiterführende Versuche mit einem Nasstrenntisch unternommen, die in Kapitel 6.6.4 beschrieben sind.

Neben den reinen Metallfrachten müssen auch die Metallkonzentrationen berücksichtigt werden. Liegen sie zu niedrig, wird eine Rückgewinnung technisch aufwendig und ist dadurch unter Umständen ökonomisch nicht tragbar. Die Mindestkonzentrationen für eine erfolgreiche Vermarktung schwanken erheblich gemäß Angebot und Nachfrage und müssen daher im Einzelfall und im Zusammenhang mit den verfügbaren Rückgewinnungstechnologien bewertet werden.

6.6.2 Versuch 2: Variation der Aufbereitungstechnik – Mechanische und manuelle Behandlung von schnurgebundenen Festnetztelefonen

Ziel dieses Versuches war es, die Verteilung der RePro-Metalle in den Outputfraktionen der unterschiedlichen Behandlungsvarianten manuell und mechanisch zu untersuchen. Es sollte dabei insbesondere ergründet werden, ob durch eine manuelle Behandlung höhere Rückgewinnungsraten ressourcenrelevanter Metalle erzielt werden können als durch mechanische Verfahren.

Für diese Versuche stand eine große Charge von gleichartigen schnurgebundenen Festnetztelefonen zur Verfügung, wie sie als Bestandteil der Büroausstattung in großen Unternehmen zu finden sind. Mit diesem homogenen Versuchsmaterial war es möglich, einen direkten Vergleich zwischen mechanischer Behandlung und manueller Demontage durchzuführen.

Das prinzipielle Versuchskonzept ist in Abbildung 97 veranschaulicht. Nach der Teilung des Versuchsmaterials wurde der größere Teil der Telefone bei der ELPRO GmbH mechanisch aufbereitet. Der kleinere Teil der Telefone wurde an der TU Hamburg-Harburg manuell zerlegt, um werthaltige Komponenten für die Rückgewinnung von Metallen zu separieren.

Abbildung 97: Versuchskonzept für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage von schnurgebundenen Festnetztelefonen



Quelle: eigene Darstellung

6.6.2.1 Versuchsmaterial

Für die Versuche standen insgesamt 2.390 kg Telefone zur Verfügung. Einige der Geräte sind beispielhaft in Abbildung 98 bis Abbildung 101 zu sehen. Die Anschluss- und Hörerkabel waren bereits abgetrennt, ansonsten waren die Telefone vollständig und unbeschädigt.

Die Teilung des Versuchsmaterials wurde während der Aufgabe der Telefone aus dem Bunker auf das Förderband zum Rotorshredder durchgeführt (Abbildung 98–Abbildung 101). Die Telefone für die manuelle Demontage wurden einzeln und über den gesamten Versuchszeitraum verteilt aus dem Materialstrom gegriffen. Auf diese Weise konnte aus den insgesamt 10 Containern eine repräsentative Teilmenge von 77 kg Telefonen und Hörern entnommen werden (Abbildung 102).

Abbildung 98: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (a)



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 99: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (b)



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 100: Schnurgebundene Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage(c)



Quelle: Ökopol GmbH

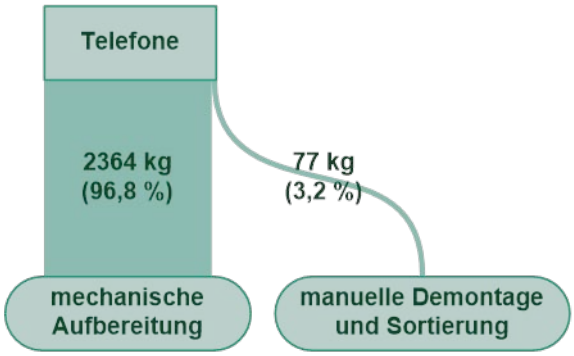
Abbildung 101: Hörer der schnurgebundenen Festnetztelefone für die mechanische Behandlung und manuelle Demontage (d)



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 102: Teilung des Versuchsmaterials während der Aufgabe auf ein Förderband (links) und Massenverhältnisse der Teilmengen für die mechanische Aufbereitung und manuelle Demontage (rechts)





Quelle: Ökopol GmbH

6.6.2.2 Versuchsdurchführung

Für die mechanische Aufbereitung durchliefen die Telefone alle Einzelschritte der Nachzerkleinerung, wie sie in Versuch 1 in Abbildung 92 dargestellt sind. Die manuelle Demontage erfolgte weitgehend gewaltfrei durch Öffnen der Schraub- und Schnappverbindungen. Es wurden insgesamt 8 Fraktionen gebildet:

- Kunststoffe grau,
- Kunststoffe schwarz,
- Metallteile (z. B. Schrauben),
- Batterien,
- Lautsprecher und Mikrophone aus Hörern,
- Lautsprecher und Mikrophone aus Freisprecheinrichtungen,
- Displays mit Kunststoffschutz und
- Halterung, Platinen.

6.6.2.3 Probenahme und chemische Analyse

Die Probenahme und chemische Analyse der mechanisch erzeugten Fraktionen erfolgte wie in Versuch 1 nach dem in Kapitel 6.6.1.3 beschriebenen Verfahren. Von den manuell erzeugten Fraktionen wurden nur diejenigen untersucht, die ressourcenrelevante Metalle enthalten:

- Platinen,
- Lautsprecher und Mikrophone aus Hörern,
- Lautsprecher und Mikrophone aus Freisprecheinrichtungen und

- Displays.

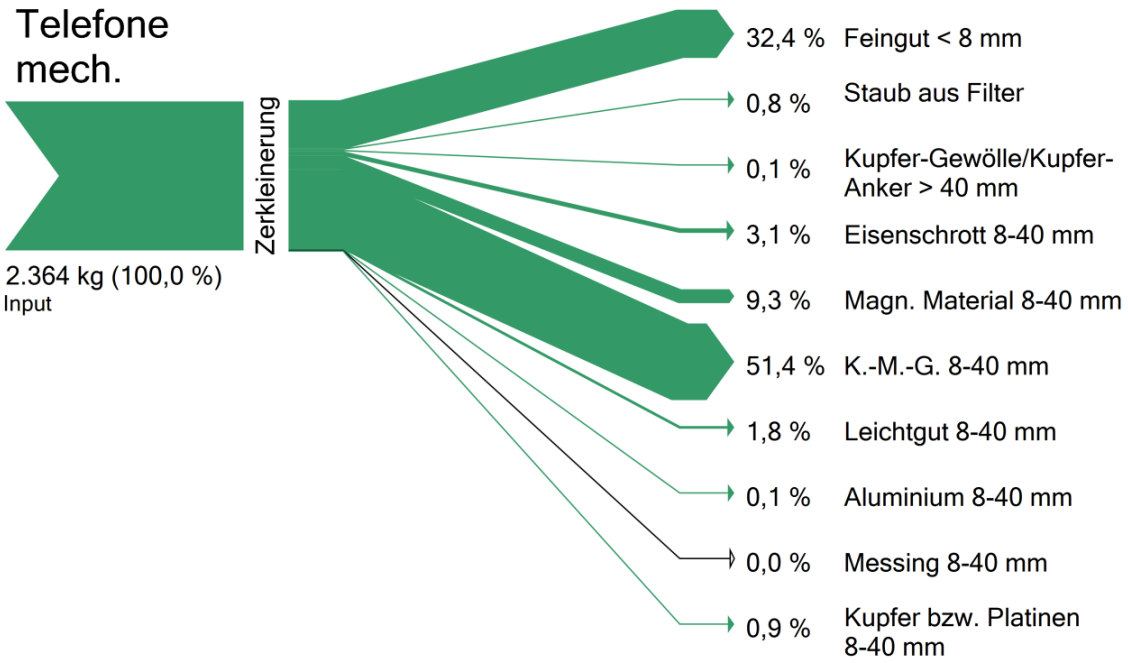
Durch eine Probenteilung wurden aus den Fraktionen Laborproben hergestellt. Vor der Aufbereitung zu Analyseproben wurden die Elkos von den Platinen entfernt. Anschließend wurden die Laborproben bei 550 °C geglüht und die Rückstände als Analyseproben verwendet. Die chemischen Analysen folgten dem bereits beschriebenen Vorgehen.

6.6.2.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden wie zuvor in Form von Materialflussdiagrammen, Transferkoeffizienten und Stoffkonzentrationen dargestellt (vgl. Kapitel 6.6.1.4). Eine quantitative Bestimmung war für die Elemente Au, Ag, Pd, Co, Ga, Sn, Y und Nd möglich. Die Konzentrationen von Ta lagen stets unterhalb der Bestimmungsgrenze, In konnte nur in den Displays aus der manuellen Zerlegung bestimmt werden. Versuch Telefone mech.

Die mechanische Zerkleinerung und Sortierung der Telefone erzeugte vor allem die Fraktionen K.-M.-G., Feingut und magnetisierbares Material mit einem Gesamtmassenanteil von ca. 93 % (Abbildung 103).

Abbildung 103: Materialflussdiagramm für die mechanische Aufbereitung von schnurgebundenen Festnetztelefonen



Quelle: eigene Darstellung

Ein wesentlicher Transfer von ressourcenrelevanten Metallen findet nur in die beiden Hauptfraktionen Feingut und K.-M.-G. statt (Tabelle 103). Trotz des geringeren Massenanteils sind die Transferkoeffizienten für das Feingut extrem hoch, im Fall von Co sogar nahe an 100 %. In einzelnen Fällen gibt es auch einen nennenswerten Austrag in den Filterstaub (Nd) und in das Leichtgut (Ga, Y).

Tabelle 103: Transferkoeffizienten (%) der ressourcenrelevanten Metalle und deren absolute Massen (Telefone mech.)

Fraktionen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	69,8	46,2	88,0	97,6	45,5	81,4	77,0	86,8
Staub aus Filter	0,6	1,4	0,8	2,4	2,1	1,7	4,2	5,6
Kupfer-Gewölle/ Kupfer-Anker > 40 mm	0,4	0,2	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1
Eisenschrott 8-40 mm	0,1	< 0,1	< 0,1	< BG	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
K.-M.-G. 8-40 mm	28,0	48,1	8,6	< BG	43,4	15,9	12,9	6,2
Leichtgut 8-40 mm	1,1	4,1	2,4	< BG	8,9	0,9	5,9	1,2
Aluminium 8-40 mm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Messing 8-40 mm	< BG	< 0,1	< 0,1	< BG	< BG	< 0,1	< BG	< BG
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	–	–	–	–	–	–	–	–
absolute Massen (mg)	**13.334**	**178.348**	**15.317**	**49.445**	**1.663**	**1.004.879**	**1.869**	**34.707**

In der Hauptfraktion K.-M.-G. werden nur geringe Konzentrationen der RePro-Metalle gemessen, die deutlich unter denen im Input liegen (vgl. Tabelle 104). Die hohen Metallfrachten kommen also nur durch den großen Massenanteil zustande. Deutlich höhere Konzentrationen liegen dagegen in der zweiten Hauptfraktion Feingut vor. Außerdem kommt es auch hier wie in Versuch 1 zu Anreicherungen im Filterstaub und im Leichtgut, beide Fraktionen spielen massenmäßig jedoch kaum eine Rolle.

Tabelle 104: Konzentrationen (mg/kg) der ressourcenrelevanten Metalle (Telefone mech.)

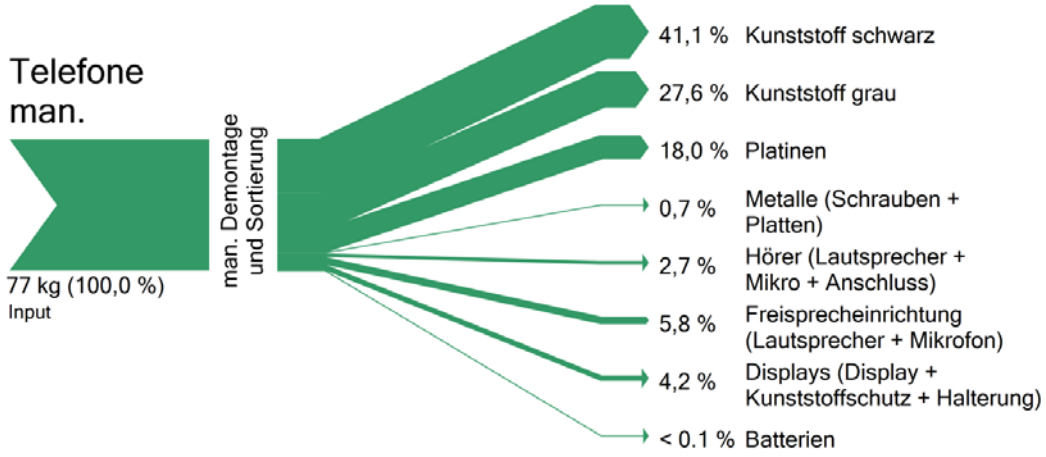
Fraktionen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Feingut < 8 mm	12	107	18	63	1	1067	1	39
Staub aus Filter	4	121	6	59	2	861	4	97
Kupfer-Gewölle/Kupfer-Anker > 40 mm	28	193	14	18	< 1	230	1	17

Fraktionen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Eisenschrott 8-40 mm	< 1	1	< 1	< BG	3	4	< 1	< 1
K.-M.-G. 8-40 mm	3	71	1	< BG	1	131	< 1	2
Leichtgut 8-40 mm	3	169	8	< BG	3	213	3	10
Aluminium 8-40 mm	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	7	< 1	< 1
Messing 8-40 mm	< BG	< 1	< 1	< BG	< BG	1	< BG	< BG
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm								
Input (berechnet)	**6**	**75**	**6**	**21**	**1**	**425**	**1**	**15**

6.6.2.5 Versuch Telefone man.

Durch die manuelle Zerlegung war es möglich, zwei differenzierte Fraktionen von großflächigen schwarzen bzw. grauen Kunststoffen zu erzeugen, die zusammen ca. 69 % der Gesamtmasse ausmachen (Abbildung 104). Von den metallhaltigen Fraktionen haben die Platinen mit 18 % den größten Anteil, gefolgt von den Komponenten aus Hörern und Freisprecheinrichtungen und den Displays. Zusätzlich konnten einige kleine Batterien separiert werden mit einer Gesamtmasse von 24 g.

Abbildung 104: Materialflussdiagramm für die manuelle Demontage von schnurgebundenen Festnetztelefonen



Quelle: eigene Darstellung

Mit Hilfe der Transferkoeffizienten wird ersichtlich, dass die gezielte Separation der Platinen im Fall der Telefone nahezu alle ressourcenrelevanten Metalle in dieser Fraktion vereint (Tabelle 105). Die anderen Fraktionen enthalten nur einzelne nennenswerte Metallfrachten, z. B. Ag in Displays oder Sn in Freisprecheinrichtungen.

Tabelle 105: Transferkoeffizienten (%) der ressourcenrelevanten Metalle und deren absolute Massen (Telefone man.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Platinen	99,6	72,9	95,2	92,6	86,6	80,8	100,0	93,4

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Hörer	< BG	2,1	2,7	7,3	4,3	5,6	< BG	1,4
Freisprecheinrichtung	< BG	7,4	2,1	< BG	9,1	11,5	< BG	2,9
Displays	0,4	17,6	< BG	0,1	< BG	2,2	< BG	2,2
absolute Massen (mg)	**3.364**	**4.740**	**2.628**	**25.014**	**229**	**11.821**	**204**	**2.338**

Die hohen Metallfrachten in der Fraktion Platinen spiegeln sich prinzipiell in den Konzentrationen wider (Tabelle 106). Auffällig sind die hohen Konzentrationen von Nd und Co, die hauptsächlich in magnetischen Materialien verwendet werden. Eine Erklärung können die kleinen Lautsprecher der Freisprecheinrichtungen sein, die bei näherer Betrachtung auf den Platinen identifiziert werden konnten. Bei den Lautsprechern der Hörer ist ein Einsatz von extrem leistungsstarken seltenerdhaltigen Magneten aufgrund des größeren Platzangebots nicht zwingend nötig, hier können auch z. B. Co-haltige Ferrite verwendet werden.

Tabelle 106: Konzentrationen (mg/kg) der ressourcenrelevanten Metalle (Telefone man.)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Platinen	243	251	181	1681	14	692	15	158
Hörer	< BG	48	34	878	5	318	< BG	16
Freisprecheinrichtung	< BG	79	12	< BG	5	307	< BG	16
Displays	4	261	< BG	7	< BG	80	< BG	16
Input (berechnet)	**44**	**62**	**34**	**325**	**3**	**154**	**3**	**30**

6.6.2.6 Diskussion

Die Teilung des Versuchsmaterials für die mechanische bzw. manuelle Aufbereitung erfolgte durch eine zufällige Entnahme einer kleinen Teilmenge aus dem laufenden Strom. Auf diese Weise sollte eine möglichst repräsentative Menge an Telefonen für die manuelle Demontage gewonnen werden. Ein direkter Vergleich zeigt jedoch erhebliche Unterschiede in den Konzentrationen der ressourcenrelevanten Metalle (Tabelle 107). Auf gleichem Niveau liegen nur die Konzentrationen von Ag, die Werte von Au, Pd und Co liegen jeweils sogar eine Größenordnung auseinander.

Tabelle 107: Konzentrationen (mg/kg) im Input der beiden Versuche mit schnurgebundenen Festnetztelefonen

Input	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Telefone mech. (berechnet)	6	75	6	21	1	425	1	15
Telefone man. (berechnet)	44	62	34	325	3	154	3	30

Wie bei den Versuchen mit den EAG der SG 3 und SG 5 kommen auch hier mehrere Ursachen in Betracht:

- Keine repräsentative Teilmenge als Input für die manuelle Zerlegung

- Keine repräsentative Probenahme und -aufbereitung
- Nicht erfasste Verluste in unbeprobten Fraktionen

Die Hauptursache ist vermutlich bei der Probenteilung zu suchen. Es wurde zwar aus allen Containern Telefone und Hörer gegriffen, dabei konnte jedoch nicht sichergestellt werden, dass die verschiedenen Gerätetypen in beiden Teilmengen im gleichen Zahlenverhältnis vorlagen. Für eine repräsentative Probenteilung wäre vorab eine genaue Erfassung der Anzahl der verschiedenen Gerätetypen notwendig gewesen, um dann gezielt eine Auswahl für die manuelle Zerlegung zu treffen. Bei knapp 2,5 t Versuchsmaterial bestehend aus ca. 30 Gerätetypen von 5 Herstellern wäre dieses Vorgehen mit einem enormen Zeitaufwand verbunden gewesen. Auch hier gilt: Eine Vergleichbarkeit von relativen Kenngrößen wie z. B. den Transferkoeffizienten ist gegeben. Die Konzentrationen sollten jedoch nicht direkt verglichen werden, sondern vielmehr die erzielten Anreicherungen in Bezug auf die Konzentrationen im Input.

Die kumulierte Verteilung der ressourcenrelevanten Metalle zeigt die Summe der Massenanteile in den einzelnen Fraktionen (Tabelle 108). Bei der mechanischen Aufbereitung erfolgte der Austrag im Wesentlichen in das Feingut, aber auch in das K.-M.-G. Die manuelle Zerlegung zeigte, dass eine extrem hohe Aufkonzentrierung durch die Separation der Platinen möglich ist.

Tabelle 108: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für den Versuch „Telefone mechanisch“ mit schnurgebundenen Festnetztelefonen

Fraktion	Massenanteile (%) RePro-Metalle
Feingut < 8 mm	77,3
Staub aus Filter	1,8
Kupfer-Gewölle/ Kupfer-Anker > 40 mm	0,1
Eisenschrott 8-40 mm	< 0,1
K.-M.-G 8-40 mm	19,5
Leichtgut 8-40 mm	1,4
Aluminium 8-40 mm	< 0,1
Messing 8-40 mm	< 0,1
Kupfer bzw. Platinen 8-40 mm	< 0,1

Tabelle 109: Kumulierte Verteilungen der ressourcenrelevanten Metalle über die einzelnen Fraktionen für den Versuch „Telefone manuell“ mit schnurgebundenen Festnetztelefonen

Massenanteile (%) RePro-Metalle	Fraktion
88,5	Platinen
5,3	Hörer

Massenanteile (%) RePro-Metalle	Fraktion
3,7	Freisprecheinrichtung
2,5	Displays

Auf den ersten Blick sieht das Ergebnis der mechanischen Aufbereitung nicht schlecht aus, liegt der Austrag der beiden Hauptfraktionen doch bei hohen 96,8 %. Allerdings beträgt ihr Massenanteil auch ca. 84 %, d. h. es wurde insgesamt nur eine geringe Anreicherung erzielt. Für die Fraktion K.-M.-G. ließe sich das Ergebnis durch die nachträgliche Sortierung mit dem Induktionssensor zwar verbessern, im Falle des Feinguts sind aber weitere aufwendige und mit Verlusten behaftete Prozesse nötig.

Bei der manuellen Zerlegung konnten 88,5 % der ressourcenrelevanten Metalle in einer Fraktion mit einem Massenanteil von nur 18 % wiedergefunden werden. Allerdings ist der Aufwand für die manuelle Zerlegung enorm. In der Praxis würden zwar andere Methoden der manuellen Demontage angewendet werden, aber dennoch wäre mit einem zeitlichen und damit finanziellen Aufwand zu rechnen, der dieses Vorgehen unwirtschaftlich macht.

6.6.3 Versuch 3: Mechanische Separation und Anreicherung von Tantal aus Laptop-Unterteilen

Am Beispiel der Ta-Kondensatoren sollte überprüft werden, ob eine Variation der mechanischen Aufbereitung von EAG zu einer gezielten Anreicherung bestimmter Metalle führt und eine solche Variation somit die Ta-Rückgewinnung aus Kondensatoren technisch und wirtschaftlich möglich machen kann.

In der Elektrotechnik findet Tantal hauptsächlich als Anode in Elektrolytkondensatoren Verwendung und liegt dadurch konzentriert vor. Hinzu kommt, dass Ta-Kondensatoren einige charakteristische Merkmale wie Farbe und Dichte aufweisen. Die Abtrennung und anschließende Separation dieser Bauteile mit Sortierverfahren verspricht daher ein Konzentrat erzeugen zu können, das für eine Rückgewinnung von Tantal geeignet sein könnte.

Ziel war es, durch geeignete Verkettung bekannter Verfahrensschritte ein solches Konzentrat zu erzeugen, ohne dabei auf manuelle Prozesse zurückgreifen zu müssen.

6.6.3.1 Versuchsmaterial

Als Versuchsmaterial wurden Laptop-Unterteile gewählt, da hier eine große Anzahl von Ta-Kondensatoren erwartet werden kann. Untersuchungen bei der ELPRO GmbH haben bei einer durchschnittlichen Masse von ca. 1,3 kg pro Laptop-Unterteil ca. 3,9 g Ta-Elektrolytkondensatoren ergeben[62].

Für die Versuche standen insgesamt 828 kg Laptop-Unterteile zur Verfügung. Bildschirme, Batterien und Tastaturen sowie Teile der Gehäuse wurden zuvor manuell entfernt (Abbildung 105–Abbildung 108).

[62] Dieser Wert wurde im Rahmen des durchgeführten Versuchs berücksichtigt. Zu beachten ist, dass die Literaturstudien zur Identifikation der RePro-Produkte teilweise zu anderen Werten geführt haben.

Abbildung 105: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (a)



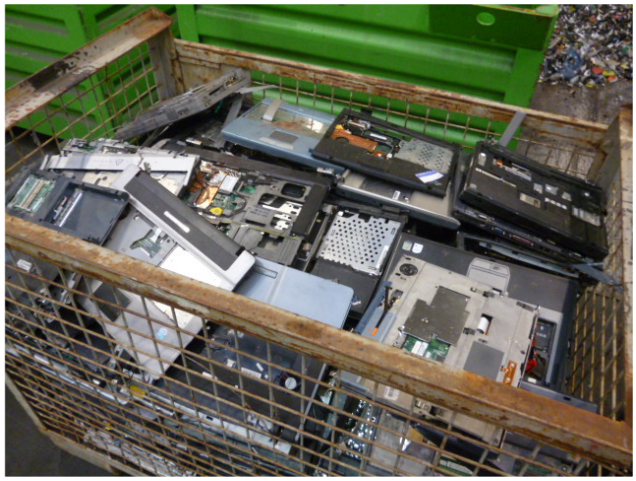
Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 106: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (b)



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 107: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (c)



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 108: Laptop-Unterteile vor der mechanischen Zerkleinerung (d)



Quelle: Ökopol GmbH

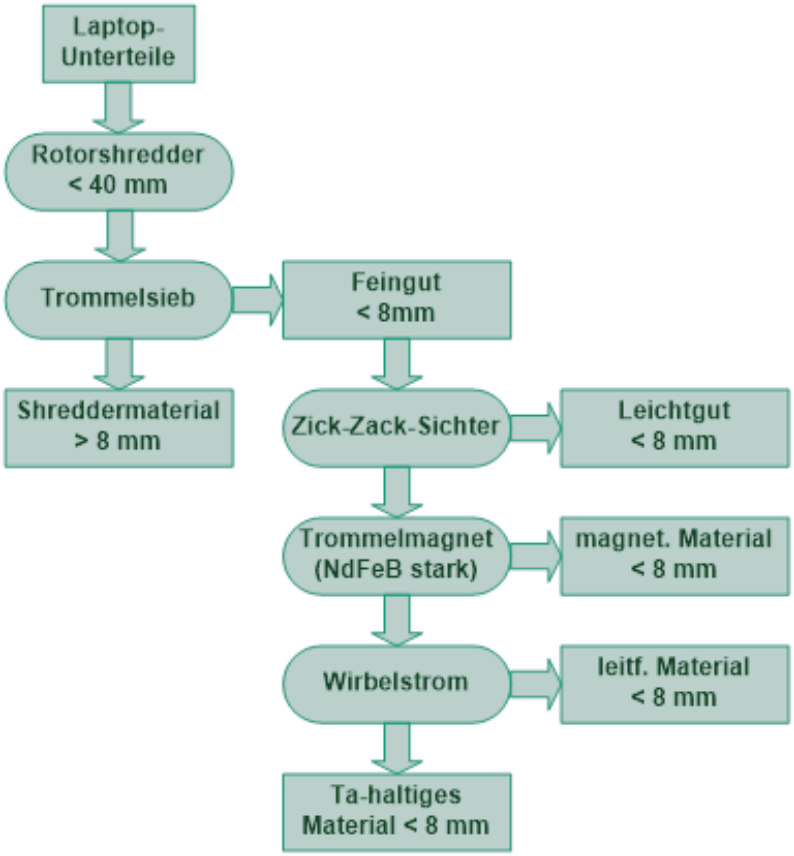
6.6.3.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgte in zwei Teilen. Der mechanische Aufschluss und die ersten Trenn- und Sortierschritte wurden vor Ort bei der ELPRO GmbH durchgeführt, die weitere Aufkonzentrierung der Ta-Kondensatoren bzw. des Tantals erfolgte anschließend an der TU Clausthal.

6.6.3.2.1 Versuche bei der ELPRO GmbH

In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass es mit einem Rotorschredder gelingt, Platinen aus EAG freizusetzen und elektronische Bauteile von der Platinenoberfläche abzulösen. Aufgrund der typischen Größen gelangen viele der Bauteile in das Feingut < 8 mm und müssen anschließend aussortiert bzw. in einer definierten Fraktion angereichert werden (Abbildung 109).

Abbildung 109: Verfahrensschema zur Abtrennung und Anreicherung von Ta-Kondensatoren aus Laptop-Unterteilen (ELPRO GmbH)



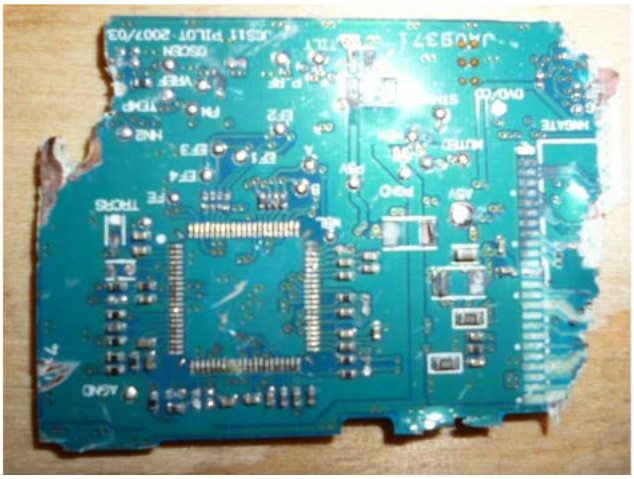
Quelle: eigene Darstellung

Zu diesem Zweck folgte nach der Zerkleinerung und Absiebung des Feinguts < 8 mm eine erste Dichtetrennung mit einem Zick-Zack-Sichter, um Leichtgut wie z. B. Kunststoffe und Folien abzutrennen. Anschließend sollten mit Hilfe einer Magnet- und Wirbelstromscheidung metallische Teile wie z. B. Schrauben und Drähte separiert werden.

Die Wirkung der Schlagbeanspruchung im Rotorshredder auf bestückte Platinen ist in Abbildung 110 und Abbildung 111 zu sehen. Die Platinen werden zu Bruchstücken unterschiedlicher Größe zerteilt, dabei lösen sich die elektronischen Bauteile durch direkten Stoß bzw. die damit verbundenen starken Beschleunigungen. Die Trennung der Bauteile von den Platinen ist keineswegs vollständig, ein Teil verbleibt auf den Platinen und gelangt so in das Shreddermaterial > 8 mm.

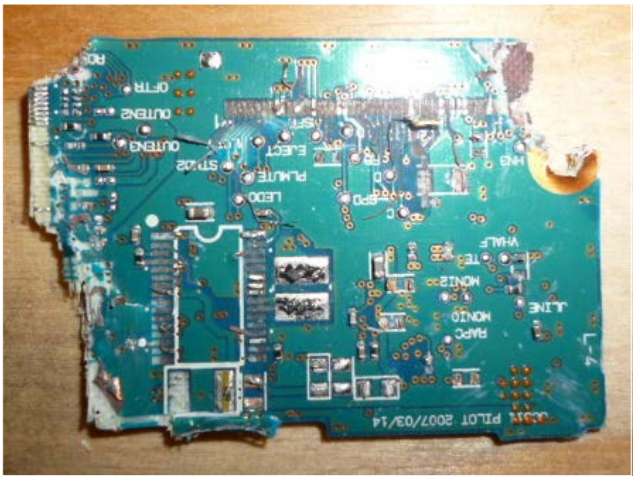
Das Shreddervormaterial > 8 mm wurde im Rahmen dieser Versuche nicht weiterbehandelt, somit sind alle nicht abgelösten Ta-Elkos als Verlust zu betrachten.

Abbildung 110: Bruchstück einer Platine nach der Zerkleinerung im Rotorshredder Vorderseite



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 111: Bruchstück einer Platine nach der Zerkleinerung im Rotorshredder Rückseite



Quelle: Ökopol GmbH

Für die weiterführenden Versuche standen insgesamt 280 kg des Feinguts < 8 mm zur Verfügung (Abbildung 112 und Abbildung 113). Das menschliche Auge ist praktisch nicht in der Lage, einzelne Ta-Elkos in diesem Gemisch zu erkennen, was bei der durchschnittlichen Bauteilgröße und einem geschätzten Massenanteil der Ta-Elkos von 0,3 % im Ausgangsmaterial auch nicht zu erwarten war.

Im nächsten Schritt sollte mit Hilfe eines Zick-Zack-Sichters eine Abtrennung des Leichtguts erzielt werden, um vor allem den Kunststoffanteil signifikant zu reduzieren.

Abbildung 112: Feingut < 8 mm aus der Zerkleinerung von Laptop-Unterteilen im Rotorshredder



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 113: Feingut < 8 mm aus der Zerkleinerung von Laptop-Unterteilen im Rotorshredder



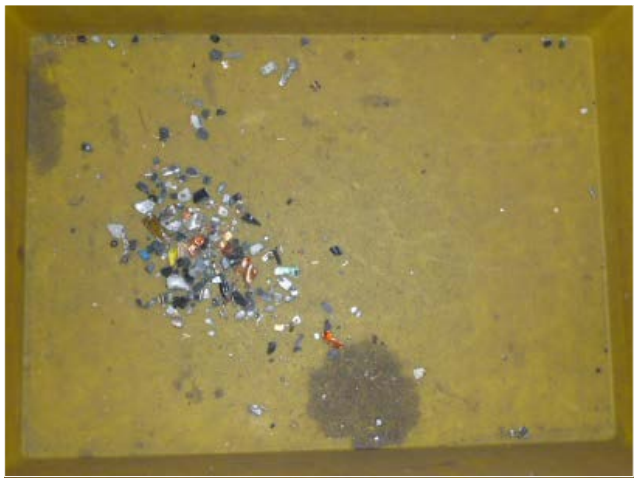
Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 114: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 50 Hz



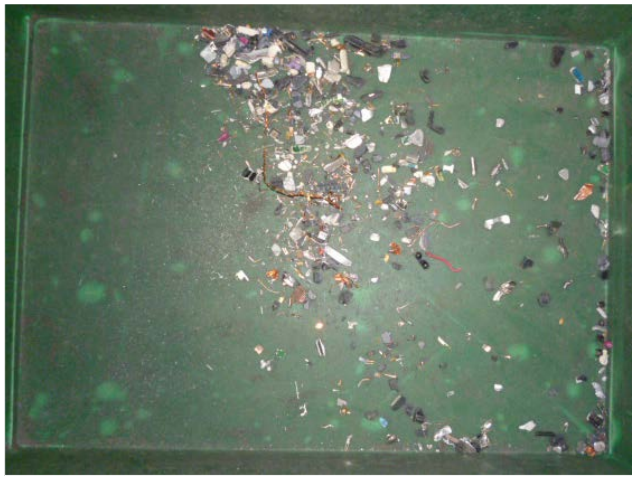
Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 115: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 45 Hz



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 116: Schwergut aus dem Zick-Zack-Sichter bei den Betriebsfrequenzen 40 Hz



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 117: Ta-Elkos im Schwergut bei Betriebsfrequenz 40 Hz



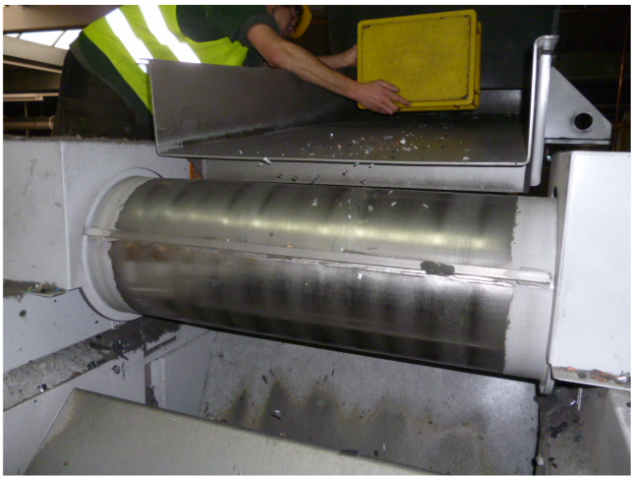
Quelle: Ökopol GmbH

Hierzu wurde zunächst die Betriebsfrequenz des Zick-Zack-Sichters mit einer Testmenge von ca. 1 kg iterativ optimiert, indem das Leichtgut bei abnehmender Betriebsfrequenz wiederholt aufgegebenen wurde, bis schließlich nur noch wenige Ta-Kondensatoren in das Leichtgut gelangten (Abbildung 114 bis Abbildung 117). Ein gutes Ergebnis konnte bei einer Betriebsfrequenz von 40 Hz erzielt werden. Mit dieser Einstellung konnten 88,3 kg Ta-haltiges Schwergut erzeugt werden für die weitere Aufbereitung mit der Magnet- und Wirbelstromscheidung zur Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen.

Die Trennleistung des Trommelmagneten wird durch den Abstand der in der Kopfrolle befindlichen Nd-Fe-B-Magnete zum Förderband bestimmt (Abbildung 118 und Abbildung 119). Es zeigte sich, dass der Abstand sehr groß gewählt werden muss, um nur wenige Ta-Elkos in das magnetisierbare Material auszutragen. Entsprechend gering war al-

lerdings auch der Trennerfolg für z. B. Schrauben und andere Eisenteile, die zum Großteil im nichtmagnetisierbaren Material für die anschließende Wirbelstromscheidung verblieben (Abbildung 118 und Abbildung 119).

Abbildung 118: Trommelmagnet mit manueller Aufgabe



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 119: nichtmagnetisierbares Material für die anschließende Wirbelstromscheidung



Quelle: Ökopol GmbH

Die Einstellmöglichkeiten der Wirbelstromscheidung sind begrenzt auf die Bandgeschwindigkeit. Bei einer minimalen Bandgeschwindigkeit von 1,8 m/s konnte nur sehr wenig leitfähiges Material abgeschieden werden (Abbildung 120 und Abbildung 121). Eine gesteigerte Bandgeschwindigkeit erhöhte zwar erwartungsgemäß den Austrag, allerdings wurden dadurch auch wieder Ta-Elkos ungewollt aus dem Stoffstrom entfernt. Als Kompromiss wurde schließlich eine Einstellung von 2,0 m/s gewählt (Abbildung 120 und Abbildung 121).

Abbildung 120: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung bei Bandgeschwindigkeiten von 1,8 m/s



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 121: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung bei Bandgeschwindigkeiten von 2,0 m/s



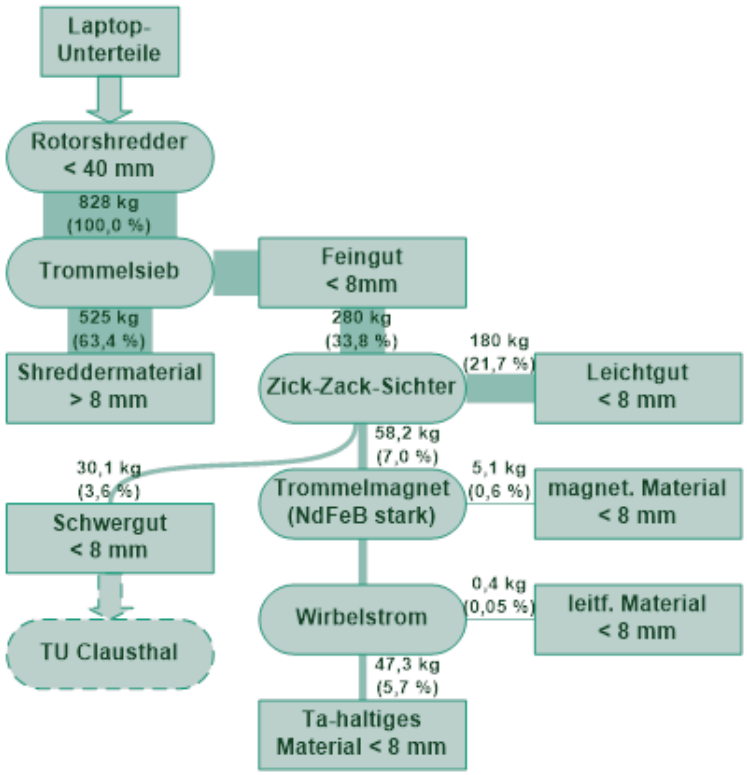
Quelle: Ökopol GmbH

Da die Trennleistung der Magnet- und Wirbelstromscheidung in den Testversuchen nur sehr gering war, wurde entschieden, nach dem Zick-Zack-Sichter das Schwergut aufzuteilen. Der kleinere Teil von 30,1 kg wurde ohne weitere Behandlung für die nachfolgenden Versuche an der TU Clausthal eingesetzt, der größere Teil von 58,2 kg wurde für die Magnet- und Wirbelstromscheidung mit oben genannten Einstellungen verwendet. Das so erzeugte Ta-haltige Material < 8 mm wurde keiner weiteren Behandlung mehr unterzogen.

Eine Übersicht der Materialflüsse durch die beschriebene Prozesskette ist in Abbildung 122 dargestellt. Durch das Absieben mit dem Trommelsieb und das Windsichten mit

dem Zick-Zack-Sichter wurde die Masse des Stoffstroms auf ca. 11 % der Inputmasse reduziert. Die anschließende Magnet- und Wirbelstromscheidung erzielte hingegen nur einen sehr kleinen Beitrag zur Anreicherung der Ta-Elkos. Daher wurde entschieden, nur das zuvor zurückbehaltene Schwergut < 8 mm weiterzuverwenden.

Abbildung 122: Materialflussdiagramm der Versuche zur Abtrennung und Anreicherung von Ta-Elkos aus Laptop-Unterteilen (ELPRO GmbH)



Quelle: eigene Darstellung

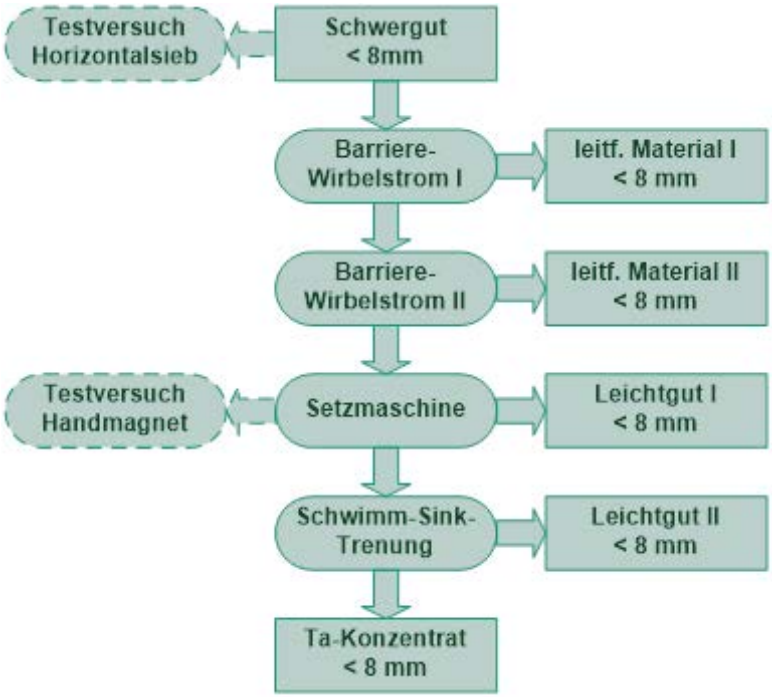
6.6.3.2.2 Versuche an der TU Clausthal

An der TU Clausthal wurde mit weiteren Methoden der mechanischen Verfahrenstechnik versucht, aus dem bei der ELPRO GmbH gewonnenen Schwergut des Zick-Zack-Sichters ein möglichst hochangereichertes Ta-Konzentrat herzustellen (Abbildung 123).

Zunächst wurde versucht, mit Hilfe eines Horizontalsiebs mit einer Lochung von 8 mm ein verbessertes Siebergebnis zu erzielen. Bei einem Trommelsieb besteht prinzipiell die Möglichkeit, dass längliche Teile wie z. B. Kabel und Drähte trotz einer Größe von mehr als 8 mm senkrecht durch das Sieb fallen. Es konnte jedoch kein deutlich besseres Trennergebnis erzielt werden (Abbildung 124), das Trommelsieb scheint für diese Anwendung also geeignet zu sein.

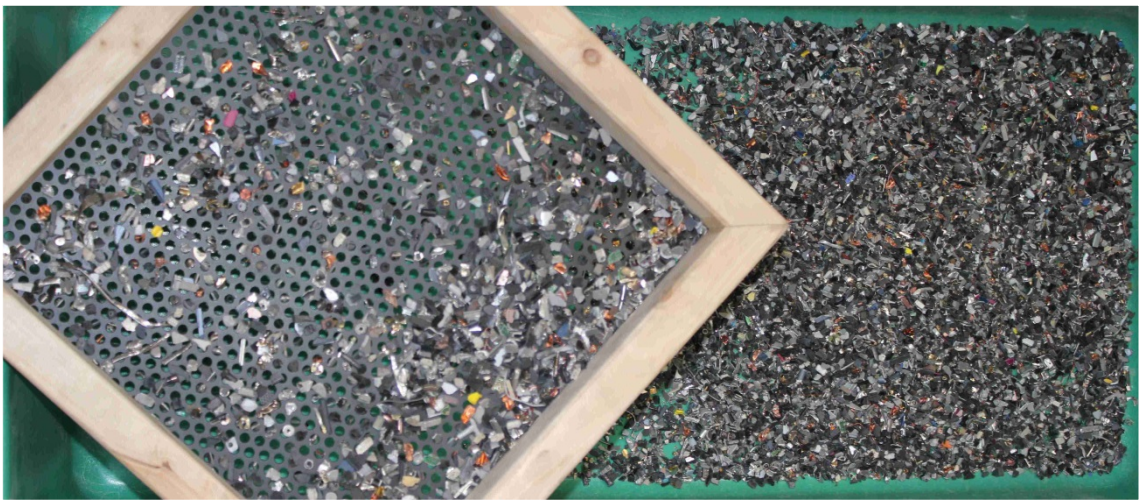
Im nächsten Schritt kam ein spezieller Barriere-Wirbelstromscheider zum Einsatz, um noch einmal einen Versuch zu unternehmen, metallische Materialen aus dem Stoffstrom zu entfernen (Abbildung 125).

Abbildung 123: Verfahrensschema zur Anreicherung von Ta-Elkos aus der Schwerfraktion des Zick-Zack-Sichters aus Laptop-Unterteilen (TU Clausthal)



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 124: Ergebnis der horizontalen Siebung des Schwerguts mit einem 8 mm Lochsieb



Quelle: Ökopol GmbH

Über die Auffangrinne, in Abbildung 125 rechts unten zu sehen, wurden jene Materialen erfasst, in denen Wirbelströme induziert werden konnten. Da die Wirbelströme bei einigen Teilen zum Springen führten und diese sich dann am linken Rand des Förderbandes sammelten, wurde dort ein Behälter platziert, um auch dieses Material aufzufangen.

Abbildung 125: Barriere-Wirbelstromscheider zur Abtrennung metallischer Materialien



Quelle: Ökopol GmbH

Zwischen diesen beiden Auffangvorrichtungen landeten alle Materialien, die nicht auf das Magnetfeld reagierten, und wurden dann über die Auffangrinne am linken unteren Bildrand ausgetragen. Das Magnetfeld wurde auf geringstmögliche Stufe eingestellt. Bei stärker wirkenden Kräften verteilte sich das Material außerhalb des Förderbandes.

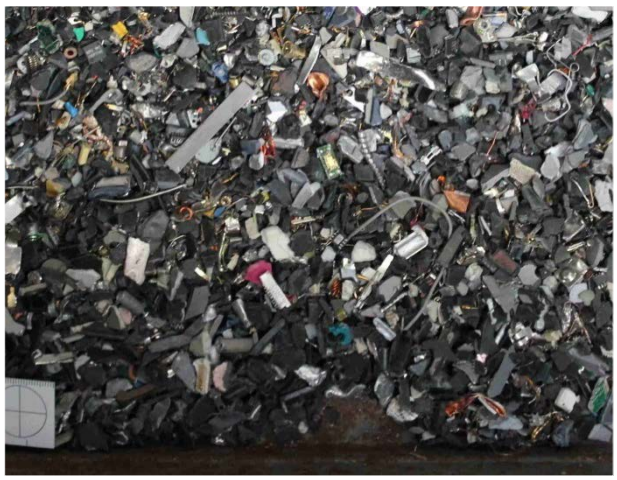
Im Gegensatz zum konventionellen Wirbelstromscheider war das Trennergebnis sehr gut, wie in Abbildung 126 und Abbildung 127 zu erkennen ist. Das nichtleitfähige Material wurde nach dem ersten Durchlauf erneut aufgegeben, um das Trennergebnis nochmals zu verbessern. Es konnte beobachtet werden, dass dabei nur sehr wenige Ta-Elkos in das leitfähige Material gelangten.

Im nächsten Schritt wurde mit dem so gewonnenen nichtleitfähigen Material die erste Dichtetrennung in einer Setzmaschine durchgeführt (Abbildung 128). Die Trennung in Leicht- und Schwergut wurde per Augenmaß festgelegt. Die Trennlinie wurde dabei so gesetzt, dass möglichst keine Ta-Elkos ins Leichtgut gelangten.

Abbildung 126: Leitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung

Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 127: Nichtleitfähiges Material aus der Wirbelstromscheidung



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 128: Dichtetrennung in der Setzmaschine (links). Die Trennung in Leichtgut (rechts oben) und Schwergut (rechts unten) erfolgte an der horizontalen grünen Linie. Einzelne Ta-Elkos im Schwergut sind im linken Bild mit roten Kästchen markiert (links)



Quelle: Ökopol GmbH

An dieser Stelle wurden mit dem Schwergut einige grundlegende Testversuche zum Verhalten von Ta-Elkos in Magnetfeldern durchgeführt. Dazu wurde das Schwergut wie in Abbildung 128 ausgebreitet und ein Handmagnet in definiertem Abstand über das Material geführt (Abbildung 129). Bei einem Abstand von 15 cm wurden die ersten magnetisierbaren Teile angezogen, ein weiterer Test erfolgte bei einem Abstand von 5 cm (Abbildung 130 und Abbildung 131). Obwohl bei großem Abstand noch nicht viel Material ausgetragen wurde, befand sich darunter bereits eine erhebliche Anzahl an Ta-Elkos. Bei kleinem Abstand vergrößerte sich die Anzahl erwartungsgemäß, ohne dass dabei jedoch alle Ta-Elkos erfasst wurden. Eine einfache Magnetscheidung, bei der die Ta-Elkos entweder in die magnetisierbare Fraktion ausgetragen werden oder in der unmagnetisierbaren Fraktion verbleiben, ist somit nicht möglich.

Abbildung 129: Handmagnet für die Testversuche zur Wirkung von Magnetfeldern auf Ta-Elkos



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 130: Mit Handmagnet im Abstand von 15 cm abgeschiedenes Material. Am rechten Bildrand sind die manuell nachsortierten Ta-Elkos zu sehen



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 131. Mit Handmagnet im Abstand von 5 cm abgeschiedenes Material. Am rechten Bildrand sind die manuell nachsortierten Ta-Elkos zu sehen



Nach den Testversuchen mit dem Handmagnet folgte die Schwimm-Sink-Trennung (Abbildung 132). Als Schwerflüssigkeit wurde Diiodmethan (CH_2I_2) eingesetzt mit einer Dichte von 3,3 g/cm³. Für die Ta-Elkos wurden in Vorversuchen Dichten zwischen 3,5 g/cm³ und 4,5 g/cm³ ermittelt, es sollte also eine Anreicherung im Schwergut erfolgen. In der Praxis zeigte sich allerdings, dass die Ta-Elkos nicht nur im Schwergut, sondern zu einem nicht unerheblichen Teil auch im Leichtgut zu finden waren (Abbildung 132 unten). Über die Wahl der Schwerflüssigkeit könnte das Ergebnis verbessert werden, z. B. durch den Einsatz von Natriumpolywolframat ($Na_6[H_2W_{12}O_{40}]$) in wässriger Lösung mit Dichten bis zu 3,1 g/cm³.

Abbildung 132: Schwimm-Sink-Trennung mit Diodmethan (CH_2I_2), einzelne Ta-Elkos sind mit roten Kästchen markiert (oben). Manuelles Nachsortieren zeigt, dass Ta-Elkos sowohl ins Leichtgut (links unten) als auch ins Schwergut (rechts unten) gelangen

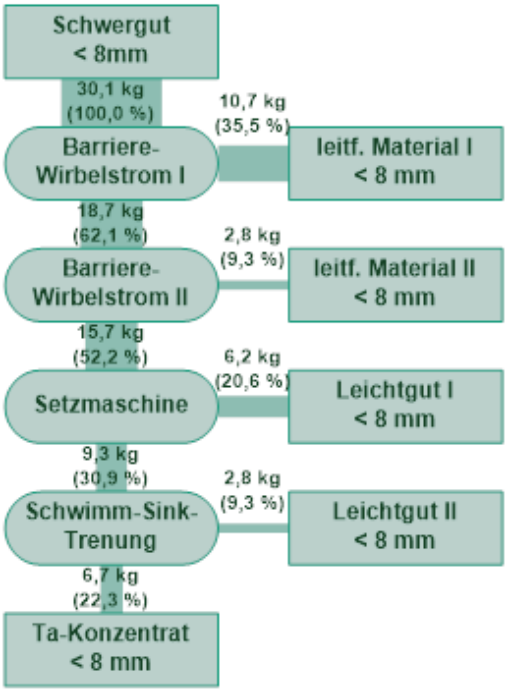


Quelle: Ökopol GmbH

Eine Übersicht der Materialflüsse durch die beschriebene Prozesskette ist in Abbildung 133 dargestellt. Mit Hilfe der zweifachen Barriere-Wirbelstromscheidung gelang eine

Abtrennung von ca. 45 % der Masse des eingesetzten Schwerguts, die beiden nachfolgenden Dichtetrennungen erzielten noch mal eine Reduktion um ca. 30 % bezogen auf die Ausgangsmasse.

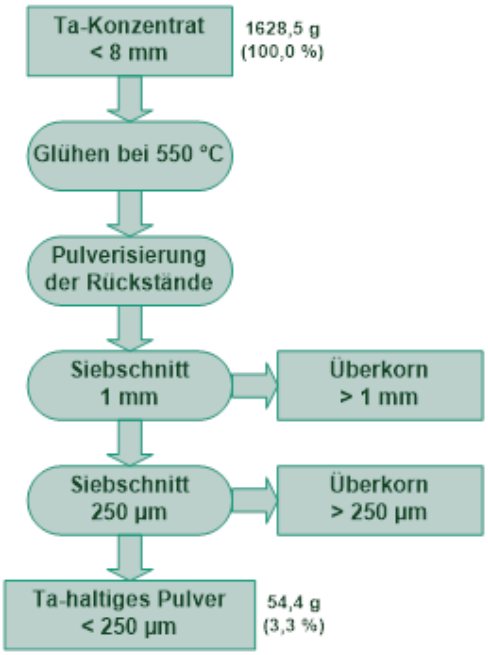
Abbildung 133: Materialflussdiagramm der Versuche zur Anreicherung von Ta-Elkos aus dem Schwergut der Zick-Zack-Sichtung aus Laptop-Unterteilen (TU Clausthal)



Quelle: eigene Darstellung

Da ein manuelles Aussortieren der Ta-Elkos aus dem Ta-Konzentrat prinzipiell zwar möglich, im größeren Maßstab aber nicht praktikabel ist, wurde eine thermische Behandlung des gewonnenen Ta-Konzentrats nachgeschaltet. Das Ziel war es, die Ta-Elkos und die darin befindlichen Sinterkörper zu zerstören und so ein Ta-haltiges Pulver freizusetzen (Abbildung 134). Dazu wurde das Ta-Konzentrat nach einer Probenteilung im Verhältnis 1:4 bei 550 °C geglüht und die Rückstände anschließend zerstoßen und homogenisiert. Es folgte eine zweistufige Siebtrennung mit Siebschnitten bei 1 mm und 250 µm, um schließlich das gewünschte Pulver zu erhalten (Abbildung 135–Abbildung 138). Die Masse des Ta-haltigen Pulvers betrug mit 54,4 g noch 3,3 % des eingesetzten Ta-Konzentrats, der Rest wurde durch das Glühen und Sieben entfernt.

Abbildung 134: Verfahrensschema zur thermischen Behandlung des Ta-Konzentrats und weiteren Anreicherung (TU Clausthal)



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 135: Ta-Konzentrat nach dem Glühen und Pulverisieren



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 136: Überkorn des Siebschnitts 1 mm



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 137: Überkorn des Siebschnitts 250 µm



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 138: Ta-haltiges Pulver < 250 µm



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.3.3 Probenahme und chemische Analysen

Im Verlauf der Versuche wurden an einigen Stellen Proben genommen für die Durchführung von chemischen Analysen, eine entsprechende Übersicht ist in Tabelle 110 dargestellt.

Es wurden generell keine Proben von Materialien genommen, die anschließend weiterverarbeitet wurden. Auch bei Prozessen, die sich als ungeeignet erwiesen, wurde auf eine Probenahme verzichtet. Bei den Versuchen an der TU Clausthal mit Kleinmengen von ca. 30 kg und weniger konnte außerdem in einigen Fällen die begründete Annahme getroffen werden, dass nur sehr wenige Ta-Elkos in falsche Fraktionen ausgetragen wurden. Dementsprechend wurden auch hier keine Proben genommen. Nach der thermischen Behandlung wurde nur das Ta-haltige Pulver als Endprodukt beprobt, mögliche Verluste könnten durch das Glühen an sich oder durch Staubanhaftungen am Überkorn entstanden sein.

Tabelle 110: Übersicht der Probenahmen und chemischen Analysen

Versuchsort	Fraktion	Probenahme	chem. Analyse	Bemerkungen
ELPRO GmbH	Shreddermaterial > 8 mm	X		Probenaufbereitung vor Ort nicht möglich
	Feingut < 8 mm			Material wurde weiterverarbeitet
	Leichtgut < 8 mm	X		Probe bei der Aufbereitung im Ofen zerstört

Versuchsort	Fraktion	Probenahme	chem. Analyse	Bemerkungen
	Schwergut < 8mm			Material wurde weiterverarbeitet
	magnet. Material < 8mm			Material irrelevant, da Prozess ungeeignet
	leitf. Material < 8mm			
	Ta-haltiges Material < 8 mm			
TU Clausthal	leitf. Material I < 8mm			Prozesse konnten gut beobachtet werden; nur sehr wenige Ta-Elkos erkennbar, daher Ta-Gehalt vermutlich sehr gering
	leitf. Material II < 8mm			
	Leichtgut I < 8 mm			
	Leichtgut II < 8 mm	X	X	Analyse von Ta und Nb
	Ta-Konzentrat < 8 mm			Material wurde weiterverarbeitet
	Überkorn > 1 mm			mögliche Verluste durch Ta-haltige Staubanhaftungen
	Überkorn > 250 µm			
	Ta-haltiges Pulver < 250 µm	X	X	Analyse von Ta, Nb, Au, Ag und Pd

Von den insgesamt vier Proben konnten zwei leider nicht analysiert werden. Im Fall des Shreddermaterials > 8 mm war eine zuverlässige Probenaufbereitung mit den vor Ort vorhandenen Mittel nicht möglich. Die Probe des Leichtguts < 8 mm wurde leider bei der Aufbereitung im Ofen zerstört, eine zweite Probe stand nicht zur Verfügung.

6.6.3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Analysewerte des Ta-haltigen Pulvers aus der thermischen Behandlung und des Leichtgut II aus der Schwimm-Sink-Trennung sind in Tabelle 111 aufgelistet. Die Ta-Konzentration in der Zielfraktion ist mit rund 21 % sehr hoch, im Leichtgut II beträgt sie dagegen nur ca. 1,4 ‰.

Um einen Vergleich mit dem Ausgangsmaterial anstellen zu können, wurde mit Hilfe der Ergebnisse von Vorversuchen ein Wert für die Konzentration von Tantal in Laptop-Unterteilen abgeschätzt. Die durchschnittliche Masse von insgesamt 20 untersuchten Laptop-Unterteilen betrug 1306,6 g. Im Mittel waren pro Laptop-Unterteil 3,9 g Ta-Elkos verbaut mit einem Ta-Anteil von ca. 37 %. Daraus ergibt sich eine rechnerische Ta-Konzentration von 1105 ppm pro Laptop-Unterteil, als ein konservativer Schätzwert wurden schließlich 1000 ppm angenommen.

Die Berechnung von Anreicherungsfaktoren zeigt, dass die Ta-Konzentration in der Zielfraktion um den Faktor 210,4 gesteigert werden konnte im Vergleich zum Ausgangsma-

terial. Die Ta-Konzentration im Leichtgut II liegt mit einem Faktor von 1,4 in der gleichen Größenordnung wie im Ausgangsmaterial. Eine Anreicherung der Edelmetalle Gold, Silber und Palladium war nicht Ziel der Versuche, für eine effiziente Rückgewinnung sollte der Austrag in eine Cu-reiche Fraktion erfolgen. An dieser Stelle ist eine Optimierung der Prozesse notwendig, oder es muss eine Rückgewinnung der Edelmetalle aus dem Pulver mit chemischen Methoden erfolgen. In beiden Fällen sind weiterführende Untersuchungen nötig, um z. B. die Wege der Edelmetalle innerhalb der Prozesskette abzubilden.

Tabelle 111: Ergebnisse der chemischen Analysen und Vergleich mit Referenzwerten, Angabe der Konzentrationen in ppm

Werte	Fraktion	Ta	Nb	Au	Ag	Pd
Analysewerte	Leichtgut II < 8 mm	1.437	547			
	Ta-haltiges Pulver < 250 µm	210.425	536	335	7.023	245
Referenz-werte	Laptop-Unterteil	(1) 1.000		(2) 66	(2) 298	(2) 28
Anreiche-rungsfaktoren (1)	Leichtgut II < 8 mm	1,4				
	Ta-haltiges Pulver < 250 µm	210,4		5,1	23,6	8,8

(1) eigene Abschätzung
(2) Buchert, Matthias (2012)

Eine Gesamtmassenbilanz von Tantal ist mit den vorliegenden Daten leider nicht möglich. Basierend auf der oben getroffenen Abschätzung enthielten die 828 kg Laptop-Unterteile 828 g Tantal. Davon konnten ca. 134 g (16,2 %) in der Zielfraktion und ca. 12 g (1,4 %) im Leichtgut II nachgewiesen werden. Die übrigen 82,4 % müssen demnach auf die anderen Fraktionen verteilt worden sein. Da die Versuche an der TU Clausthal aufgrund der Kleinmengen und des Laborcharakters gut beobachtet werden konnten, sind die jeweiligen Verluste der einzelnen Prozessschritte nicht signifikant höher einzuschätzen als die 1,4 % bei der Schwimm-Sink-Trennung. Die größten Verluste müssen daher bei den ersten Prozessschritten aufgetreten sein. Bei der Zerkleinerung der Laptop-Unterteile im Rotorshredder könnte ein erheblicher Teil der Ta-Elkos auf den Platinen verblieben und somit in das Shredder-Material > 8 mm gelangt sein. Durch eine direkte Schlageinwirkung könnten viele Ta-Elkos aber auch in kleine Stücke zerbrochen sein, die anschließend durch den Zick-Zack-Sichter ins Leichtgut ausgetragen wurden. Natürlich besteht auch die Möglichkeit, dass die Ta-Konzentration im Ausgangsmaterial überschätzt wurde und so das Bild verzerrt wird. Aber selbst wenn die tatsächliche Ta-Konzentration um den Faktor 2 niedriger lag, sind die Verluste mit 64,7 % immer noch sehr hoch.

6.6.4 Versuch 4: Aufbereitung von Feingut aus der mechanischen EAG-Behandlung mit dem Nasstrenntisch

Bei der mechanischen Zerkleinerung von EAG entsteht neben dem eigentlich gewünschten Kornband immer auch kleinteiliges Material, das vor der weiteren Aufbereitung des Materials abgesiebt wird. Die bereits durchgeführten Versuche zur Aufbereitung von EAG der SG 3 und SG 5 haben gezeigt, dass dabei erhebliche Mengen an ressourcenrelevanten Metallen in das Feingut < 8 mm ausgetragen werden. Eine direkte Rückgewinnung dieser Metalle aus dem Feingut ist wirtschaftlich nicht möglich, da ein hoher Kunststoffanteil die Vermarktung an eine Metallhütte erschwert.

Mit Hilfe eines Nasstrenntischs soll versucht werden, den Kunststoffanteil so weit zu reduzieren, dass metallreiche und damit marktfähige Fraktionen entstehen. Die Bestimmung der Massen- und Stoffflüsse dient wiederum der Identifizierung und Quantifizierung der Verlustpfade und ergänzt die bereits durchgeführten Versuche.

6.6.4.1 Versuchsmaterial

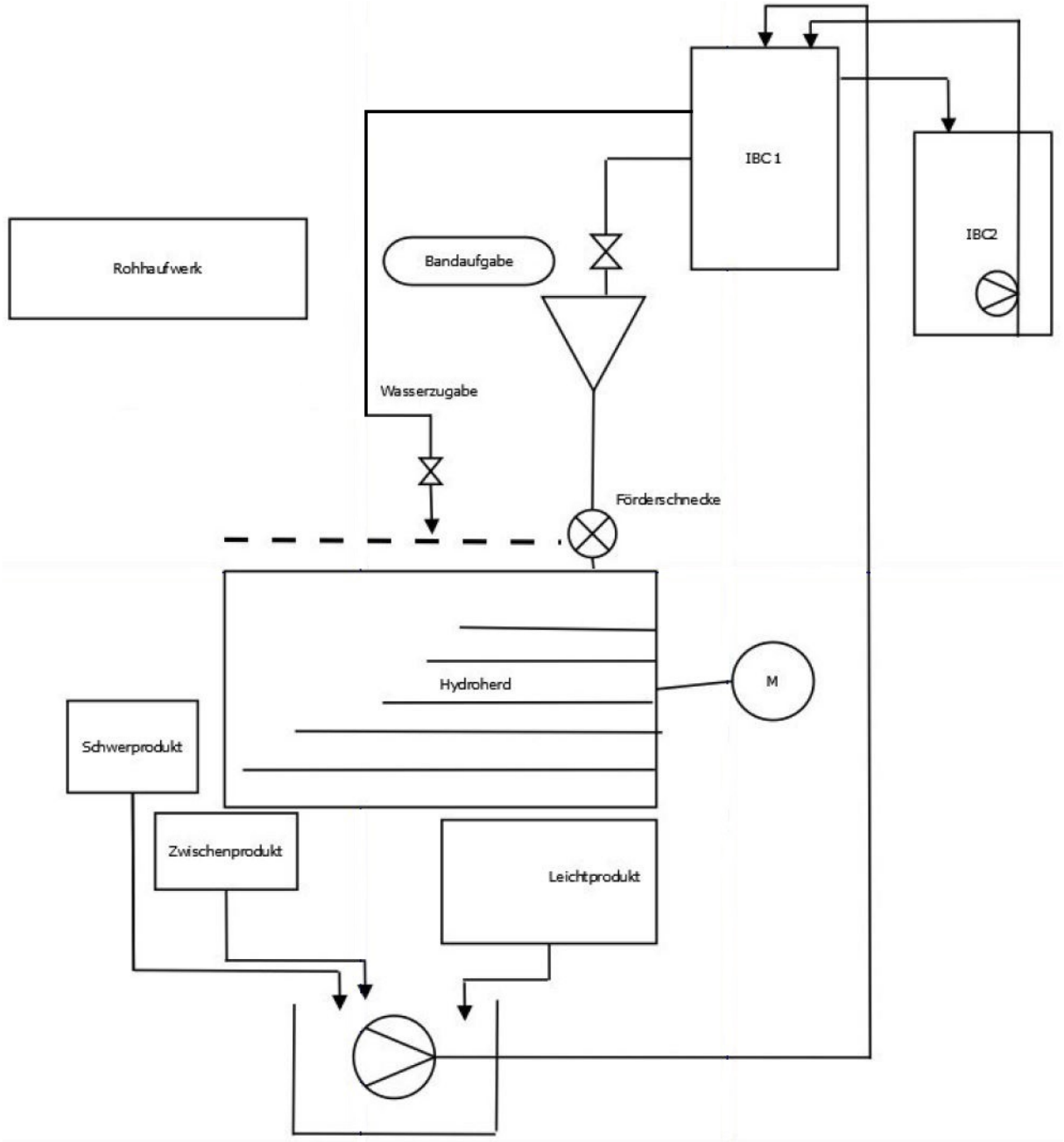
Als Versuchsmaterial wurden von der ELPRO GmbH jeweils rund 2 t Feingut < 8 mm aus der mechanischen Zerkleinerung von EAG der SG 3 und SG 5 zur Verfügung gestellt. Das Material stammte aus dem Regelbetrieb der Anlage, d. h. im Gegensatz zu den in Kapitel 6.6.1 beschriebenen Versuchen wurden die EAG zum Teil manuell vorzerlegt, um Platinenmaterial und andere Wert- und Störstoffe zu entnehmen.

6.6.4.2 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurde bei der UVR-FIA GmbH eine Anlage aufgebaut, wie sie schematisch in Abbildung 139 skizziert ist. Das Versuchsmaterial wurde von dem Rohhaufwerk manuell auf ein Förderband gegeben. Die Dosierung konnte dabei über die Bandgeschwindigkeit geregelt werden. Das Versuchsmaterial fiel von dort durch ein grobes Sieb mit einer Maschenweite von 50 mm in einen Trichter und wurde gleichzeitig mit Prozesswasser aus einem Vorratsbehälter (IBC 1) gemischt (Abbildung 140). Der zweite Vorratsbehälter (IBC 2) diente als Puffer, um überlaufendes Prozesswasser aus dem IBC 1 aufzufangen und bei Bedarf wieder in den Kreislauf zurückzuführen.

Während der Aufgabe wurden größere Gewölle aus Cu-Draht manuell aussortiert, da diese ungeeignet waren für die Dichtetrennung mit dem Nasstrenntisch. Sie wurden nur langsam oder gar nicht in Richtung Tischkante befördert und verursachten so einen Rückstau des nachfolgenden Versuchsmaterials.

Abbildung 139: Verfahrensschema zur Dichtetrennung des Feinguts < 8 mm mit einem Nasstrenntisch



Quelle: eigene Darstellung

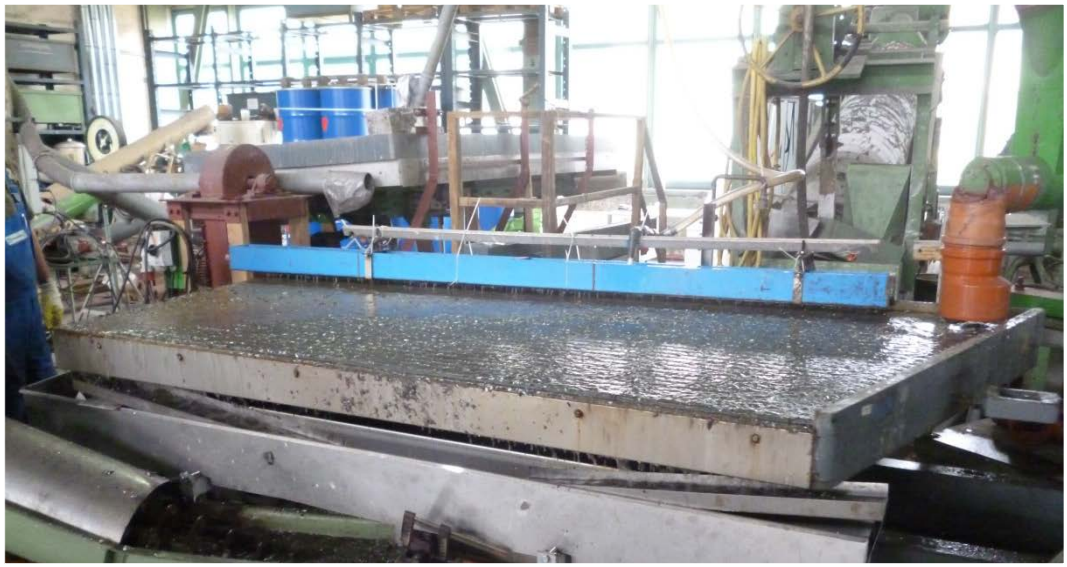
Abbildung 140: Rohhaufwerk, Bandaufgabe mit Grobsieb 50 mm und Vorratsbehälter IBC 1 und IBC 2 für Prozesswasser (von rechts)



Quelle: Ökopol GmbH

Die Aufgabe des Versuchsmaterials erfolgte mit einer Schnecke, um eine gleichmäßige Belegung des Nasstrenntischs zu erzielen. Zusätzlich wurde über eine Lochrinne weiteres Prozesswasser zugegeben, um das Leichtgut senkrecht zur Bewegungsrichtung über die Stege des Nasstrenntischs zu spülen (Abbildung 141).

Abbildung 141: Nasstrenntisch mit Aufgabe des Versuchsmaterials (rechts) und Zugabe von Prozesswasser (Mitte)



Quelle: Ökopol GmbH

Von dem Nasstrenntisch wurden insgesamt drei Fraktionen abgenommen: ein Schwerprodukt, ein Zwischenprodukt und ein Leichtprodukt (Abbildung 142).

Abbildung 142: Abnahme der Fraktionen Schwerprodukt (schwer), Zwischenprodukt (zwischen) und Leichtprodukt (leicht) vom Nasstrenntisch



Quelle: Ökopol GmbH

Das Schwer- und Zwischenprodukt wurde mit Eimern bzw. Kübeln aufgefangen und sank dort aufgrund der hohen Dichte zu Boden, während das Prozesswasser einfach überlief und in einen Pumpensumpf geleitet wurde. Das Leichtprodukt musste mit einer Schnecke entwässert werden, da ein Großteil des Materials im Prozesswasser schwebte oder schwamm (Abbildung 143). Das Prozesswasser lief durch ein Sieb in eine Auffangwanne und von dort in den Pumpensumpf, aus dem das gesammelte Prozesswasser zurück in den IBC 1 gepumpt und dann im Kreislauf geführt wurde. In der Auffangwanne setzten sich die Feinanteile des Leichtprodukts ab und bildeten innerhalb kurzer Zeit eine Schlammschicht.

Der mit diesem Aufbau erreichbare Durchsatz lag unabhängig vom Versuchsmaterial bei ca. 100 kg/h. Limitierend war dabei die Belegung des Nasstrenntischs, die für ein gutes Trennergebnis eher niedrig gehalten wurde.

Abbildung 143: Schnecke zur Entwässerung des Leichtprodukts mit Ablauf des Prozesswassers durch ein Sieb in die Auffangwanne



Quelle: Ökopol GmbH

Die Versuchsdurchführung erfolgte im einschichtigen Betrieb. Im ersten Versuch wurden 762 kg Feingut von SG 5 verarbeitet, im zweiten Versuch folgten 1036 kg Feingut von SG 3. Mehr Material konnte in der zur Verfügung stehenden Zeit und mit dem begrenzten Durchsatz nicht verarbeitet werden.

6.6.4.3 Probenahme und chemische Analyse

Während der Versuche wurden jeweils sieben Probenahmen der folgenden Fraktionen durchgeführt:

- Versuchsmaterial an der Aufgabe
- Schwerprodukt am Ablauf der Sammelrinne des Nasstrenntischs
- Zwischenprodukt am Ablauf der Sammelrinne des Nasstrenntischs
- Leichtprodukt am Abwurf der Schnecke
- Schlamm am Ablauf der Schnecke

Sämtliche Fraktionen und Proben wurden zu Haufen aufgeschichtet und dadurch grob entwässert (Abbildung 144). Die Massen wurden anschließend im feuchten Zustand bestimmt (Tabelle 112). Um die Ergebnisse der chemischen Analysen später richtig umrechnen zu können, wurden von den Fraktionen am Ende der letzten Versuche nach dem Wiegen Teilproben gezogen und deren Wassergehalt ermittelt. Die Einzelproben wurden an der TU Hamburg-Harburg zu Mischproben vereint und mit den in Kapitel 6.6.1.3 beschriebenen Methoden chemisch analysiert. Aus der Mischprobe des Schwerprodukts wurden vier Analyseproben erstellt, aus den anderen Mischproben jeweils zwei, um eine unabhängige Mehrfachbestimmung durchführen zu können.

Abbildung 144: Entwässerung der Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch und Proben in Haufwerken



Quelle: Ökopol GmbH

Tabelle 112: Übersicht der Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch, Wägungen und Probenahmen

Fraktionen	Wägung	Probeentnahme Wassergehalt	Probeentnahme chemische Analyse
SG 5 Versuchsmaterial			X
SG 5 Gewölle			
SG 5 Schwerprodukt	X	X	X
SG 5 Zwischenprodukt	X	X	X
SG 5 Leichtprodukt	X	X	X
SG 5 Schlamm	X	X	X
SG 3 Versuchsmaterial	X		X
SG 3 Gewölle	X		
SG 3 Schwerprodukt	X	X	X
SG 3 Zwischenprodukt	X	X	X

Fraktionen	Wägung	Probeentnahme Wassergehalt	Probeentnahme chemische Analyse
SG 3 Leichtprodukt	X	X	X
SG 3 Schlamm	X	X	X

6.6.4.4 Ergebnisse

Die Fraktionen der Dichtetrennung – Schwerprodukt, Zwischenprodukt, Leichtprodukt und Schlamm – waren bereits optisch deutlich erkennbar zu unterscheiden. Die Unterschiede zwischen SG 3 und SG 5 waren jedoch auf den ersten Blick gering, deshalb sind in Abbildung 145–Abbildung 148 nur exemplarisch die Fraktionen von SG 5 dargestellt.

Während das Schwerprodukt überwiegend aus Cu-Drähten, Schrauben und anderen kleinen Metallteilen besteht, sammeln sich im Leichtprodukt bevorzugt Kunststoffe und Folienstücke an. Das Zwischenprodukt bildet eine Schnittmenge, hier sind sowohl metallische als auch organische Bestandteile zu finden. Der Schlamm enthält einen Großteil des ganz feinen Materials, das bei der Entwässerung des Leichtguts zusammen mit dem Prozesswasser durch das Sieb laufen konnte.

Abbildung 145: Schwerprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 146: Zwischenprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 147: Leichtprodukt aus dem Versuch mit Feingut der SG 5



Quelle: Ökopol GmbH

Abbildung 148: Schlamm aus dem Versuch mit Feingut der SG 5



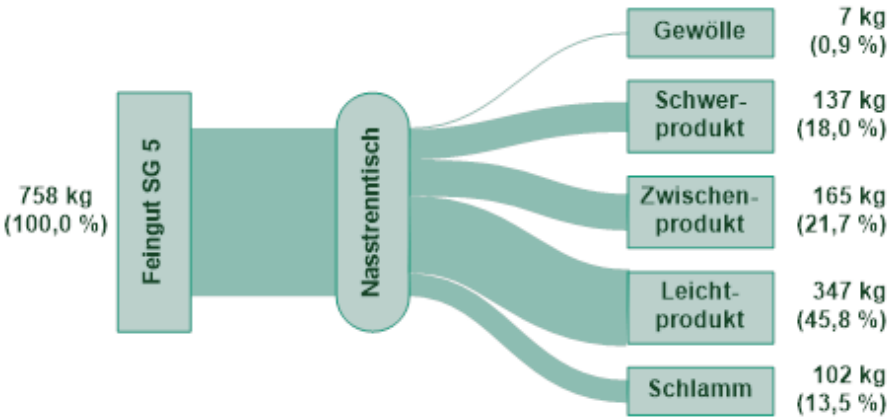
Quelle: Ökopol GmbH

Mit Hilfe der chemischen Analysen konnten die Konzentrationen derRePro-Metalle Au, Ag, Pd, Co, Ga, Sn, Y und Nd bestimmt werden. Die Konzentrationen der anderen Metalle lagen größtenteils unterhalb der Bestimmungsgrenzen, somit war ein Vergleich verschiedener Fraktionen nicht möglich.

6.6.4.4.1 Ergebnisse Versuch Feingut SG 5

Die Verteilung des Ausgangsmaterials in die verschiedenen Fraktionen kann dem Materialflussdiagramm entnommen werden (Abbildung 149). Die Hauptfraktionen sind in dieser Reihenfolge das Leicht-, Zwischen- und Schwerprodukt mit einem Anteil von ca. 86 % in Summe.

Abbildung 149: Materialflussdiagramm für die Separation mit dem Nasstrenntisch (Feingut SG 5)



Quelle: eigene Darstellung

Die Mehrfachbestimmung der RePro-Metall-Konzentrationen ergab ein sehr heterogenes Bild der Konzentrationen (Tabelle 113). Innerhalb einer Fraktion schwanken die Werte je nach Metall erheblich bis hin zu einer Größenordnung. Da letztlich keine begründete Aussage möglich ist, welche der Werte den tatsächlichen Konzentrationen entsprechen und auch eine Mittelwertbildung zu keinem seriösen Ergebnis führt, wurde für die Bewertung der Dichtetrennung ein qualitativer Vergleich angestellt.

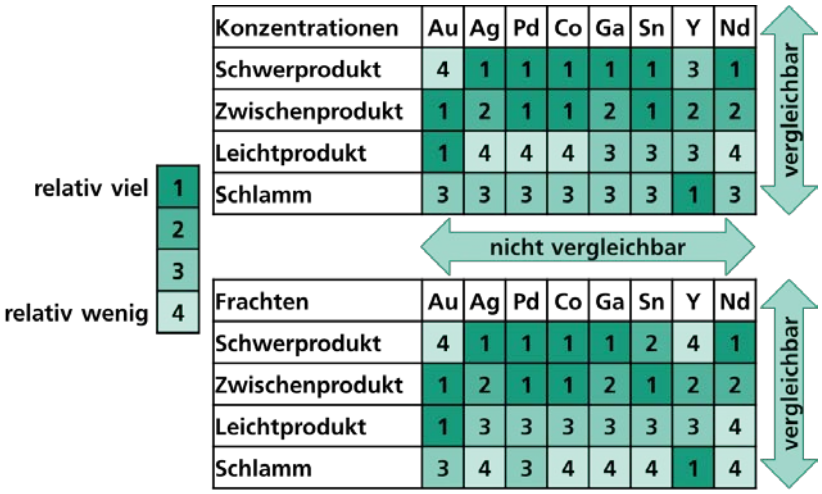
Tabelle 113: Konzentrationen (mg/kg) der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 5)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	< BG	330	11	500	14	2.090	2	1.000
Schwerprodukt	< BG	10	7	200	9	3.870	1	190
Schwerprodukt	< BG	260	11	740	18	6.110	2	2.170
Schwerprodukt	< BG	440	14	820	19	7.180	1	930
Zwischenprodukt	4	170	7	860	8	6.860	12	720
Zwischenprodukt	1	150	11	300	7	1.190	4	230
Leichtprodukt	1	30	1	160	3	150	2	50
Leichtprodukt	4	30	1	50	2	230	1	20
Schlamm	1	60	2	190	3	220	11	80
Schlamm	< 1	50	2	190	3	200	11	120
Versuchsmaterial	2	130	4	200	3	550	5	170

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Versuchsmaterial	4	130	5	210	3	720	3	170

Dazu wurde für jedes Metall eine qualitative Einschätzung des Verteilungsmusters über die einzelnen Fraktionen getroffen (Abbildung 150). Die Skala reicht von 1 bis 4, wobei 1 „relativ viel“ und 4 „relativ wenig“ bedeutet. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass ein Vergleich zwischen den Metallen nicht möglich ist, zum Beispiel entspricht im Schwerprodukt der Wert von 1 für Pd einer deutlich niedrigeren Konzentration als der gleiche Wert für Co.

Abbildung 150: Verteilungsmuster der RePro-Metalle über die einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 5)



Konzentrationen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	4	1	1	1	1	1	3	1
Zwischenprodukt	1	2	1	1	2	1	2	2
Leichtprodukt	1	4	4	4	3	3	3	4
Schlamm	3	3	3	3	3	3	1	3

Frachten	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	4	1	1	1	1	2	4	1
Zwischenprodukt	1	2	1	1	2	1	2	2
Leichtprodukt	1	3	3	3	3	3	3	4
Schlamm	3	4	3	4	4	4	1	4

Quelle: eigene Darstellung

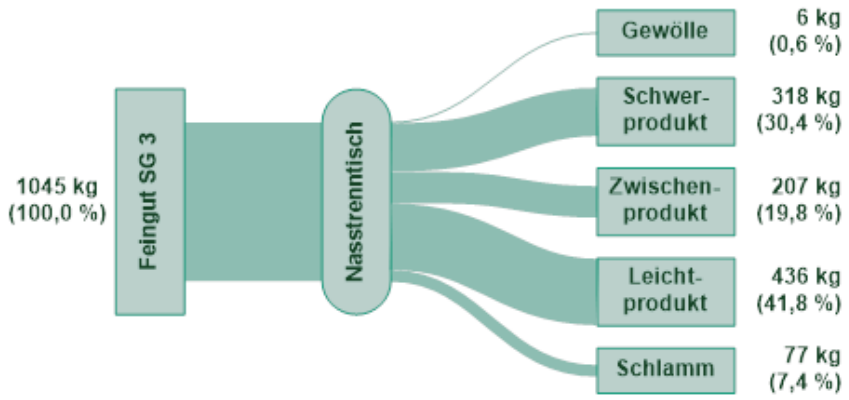
Das Verteilungsmuster der Konzentrationen zeigt, dass eine Anreicherung maßgeblich in den Fraktionen Schwer- und Zwischenprodukt stattfindet. Ausnahmen sind Au und Y, die sich im Zwischen- und Leichtprodukt bzw. im Schlamm und Zwischenprodukt anreichern.

Zusätzlich zu der Verteilung der Konzentrationen ist in Abbildung 150auch die Verteilung der Frachten dargestellt. Das Bild deckt sich im Wesentlichen mit dem der Konzentration, lediglich die Werte 3 und 4 sind auf einigen Positionen vertauscht.

6.6.4.4.2 Ergebnisse Versuch Feingut SG 3

Das Materialflussdiagramm zeigt drei Hauptfraktionen mit einem Gesamtanteil von ca. 92 %: Leicht-, Schwer- und Zwischenprodukt (Abbildung 151). Der Anteil des Schwerprodukts ist deutlich höher als bei SG 5, der Anteil des Schlamms dagegen geringer.

Abbildung 151: Materialflussdiagramm für die Separation mit dem Nasstrenntisch (Feingut SG 3)



Quelle: eigene Darstellung

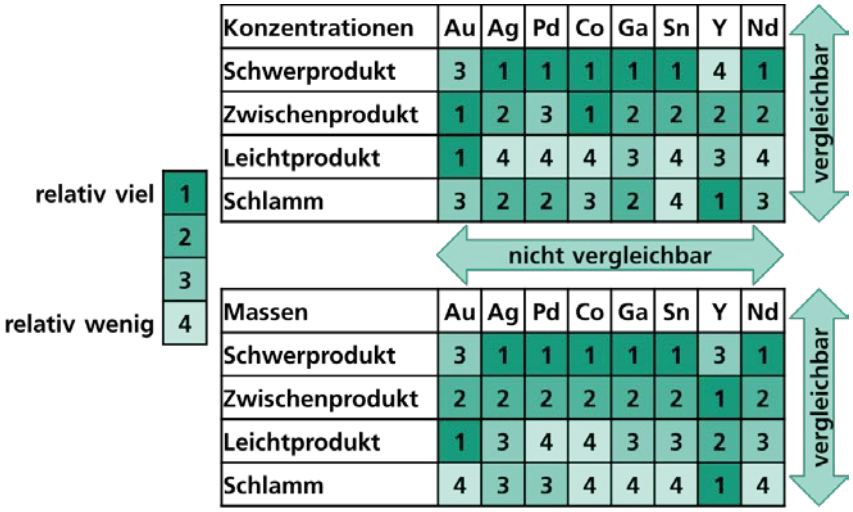
Auch bei SG 3 bewegen sich die mehrfach bestimmten Konzentrationen bei vielen der Metalle in weiten Bereichen (Tabelle 114). Die Schwankungen fallen zwar etwas geringer aus als bei SG 5, es kann jedoch auch hier nur eine qualitative Bewertung der Ergebnisse vorgenommen werden.

Tabelle 114: Konzentrationen (mg(kg) der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 3)

Fraktion	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	5	460	26	890	6	34.800	1	340
Schwerprodukt	1	620	12	1.040	3	42.200	< BG	140
Schwerprodukt	2	130	12	630	9	25.500	1	200
Schwerprodukt	1	430	17	640	17	14.100	1	450
Zwischenprodukt	14	170	5	1.010	7	2.290	2	210
Zwischenprodukt	5	170	7	980	7	5.060	6	240
Leichtprodukt	12	40	2	80	2	540	1	40
Leichtprodukt	4	40	1	60	2	1.280	1	50
Schlamm	3	170	9	360	5	910	8	150
Schlamm	6	180	11	440	5	720	9	160
Versuchsmaterial	5	350	11	860	3	19.290	2	230
Versuchsmaterial	9	310	9	290	2	3.560	2	150

Die Konzentrationen zeigen ein Verteilungsmuster, das dem der SG 5 sehr ähnlich ist (Abbildung 152). Hohe Anreicherungen sind auch hier hauptsächlich in den Fraktionen Schwer- und Zwischenprodukt zu finden, einzige Ausnahmen sind wiederum Au und Y, bei denen sich die Schwerpunkte beim Zwischen- und Leichtprodukt bzw. beim Schlamm und Zwischenprodukt befinden.

Abbildung 152: Verteilungsmuster der RePro-Metalle in den einzelnen Fraktionen der Trennung am Nasstrenntisch (Aufgabegut: Feingut SG 3)



Konzentrationen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	3	1	1	1	1	1	4	1
Zwischenprodukt	1	2	3	1	2	2	2	2
Leichtprodukt	1	4	4	4	3	4	3	4
Schlamm	3	2	2	3	2	4	1	3

Massen	Au	Ag	Pd	Co	Ga	Sn	Y	Nd
Schwerprodukt	3	1	1	1	1	1	3	1
Zwischenprodukt	2	2	2	2	2	2	1	2
Leichtprodukt	1	3	4	4	3	3	2	3
Schlamm	4	3	3	4	4	4	1	4

Quelle: eigene Darstellung

Betrachtet man statt der Konzentrationen die Frachten der Metalle, zeigen sich kleinere Verschiebungen vor allem in Richtung Leichtprodukt, da hier der hohe Massenanteil für eine stärkere Gewichtung vor allem gegenüber dem Zwischenprodukt und dem Schlamm sorgt.

6.6.4.5 Diskussion

Das primäre Versuchsziel, die Reduzierung des Kunststoffanteils bzw. die Erzeugung von metallreichen Fraktionen, konnte mit Hilfe des Nasstrenntischs grundsätzlich erreicht werden. Betrachtet man vor allem das Schwer- und Zwischenprodukt als die Zielfraktionen für die Anreicherung der RePro-Metalle, konnte die Ausgangsmasse auf 40-50 % reduziert werden. Die Verluste in die beiden Fraktionen Leichtprodukt und Schlamm lassen sich zwar aufgrund der nicht eindeutigen Analyseergebnisse nicht absolut beziffern, sie sind aber keinesfalls zu vernachlässigen. Hier ist insbesondere auffällig, dass sich Gold in der Fraktion Leichtprodukt und Yttrium u. a. im Schlamm anreichert

Die Frage der Marktfähigkeit von Schwer- und Zwischenprodukt ist eng verknüpft mit den Möglichkeiten der Rückgewinnung. Aufgrund der hohen Cu- und Edelmetallgehalte bietet sich eine Vermarktung an Cu-Hütten an. Dabei können sich die nicht näher bekannten Anteile von Fe und Al unter Umständen als wertmindernd erweisen, da sie für die Gewinnung von reinem Cu aus der Legierung entfernt bzw. verschlackt werden müssen.

Eine bessere Qualität ließe sich durch die Abtrennung von Fe und Al erzielen, dazu müsste das Material aber weiter aufbereitet werden. Insbesondere die Drähte stören bei

jeder Art von Sortier- oder Trennprozess, da durch die rasante Bildung von Gewöllen nicht nur die Handhabung des Materials erschwert wird, sondern durch den Einschluss von anderen Materialien auch neue Verwachsungen von bereits getrennten Stoffen entstehen können.

6.6.5 Versuch 5: Manuelle Entnahme von Batterien aus EAG der SG 3 und SG 5 und Identifikation von Synergien mit der Entnahme ressourcenrelevanter Komponenten

In diesem Versuch sollte zum einen der Aufwand der manuellen Entnahme von Batterien untersucht werden. Zum anderen sollten weitere Komponenten der EAG identifiziert werden, die RePro-Metalle enthalten, die durch die Batterieentnahme einfach zugänglich (gemacht) werden. EAG der SG 3 (IT-, Telekommunikationstechnik und Unterhaltungselektronik) und SG 5 (Haushaltskleingeräte, elektrische Werkzeuge usw.) weisen eine Vielzahl von Gerätetypen auf, die eine oder mehrere Batterien zum ordnungsgemäßen Betrieb erfordern. Der Begriff Batterien fasst dabei (in Übereinstimmung mit der Definition im Batteriegesetz) Primärbatterien (nicht wieder aufladbare Batterien) und Sekundärbatterien (wieder aufladbare Akkus) zusammen.

Der Batterieeinsatz folgt allein schon aus der Tatsache, dass sehr viele der hier gesammelten Geräte einen mobilen Einsatz vorsehen oder erlauben. Hauptsächlich erfüllen die Batterien in den Geräten die Aufgabe der Energieversorgung. Zur Realisierung von z. B. Speicher- und Pufferfunktionen werden in einer Vielzahl von Geräten zudem auch kleinere Primärbatterien eingesetzt.

Der kurzlebige Markt neuer mobiler Geräte der Unterhaltungselektronik, nur allein im Bereich der Handys, Smartphones und Tablets, wird langfristig auch zu einem starken Anstieg der Batteriemasse in EAG-Fraktionen führen.

Obwohl aktuell noch immer die „klassischen“, schon länger etablierten Zelltypen wie z. B. Alkali-Mangan-, Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid im Massenstrom überwiegen, ist bereits deutlich die Zunahme des Anteils an Lithium-Ionen-Batterien in den EAG zu erkennen.

Da Lithium-Ionen-Batterien eine sehr hohe Energiedichte, geringe Alterungserscheinungen sowie die Möglichkeit einer sehr effizienten Bauraumnutzung bieten, wird dieser Batterietyp zunehmend in zahlreichen Anwendungsgebieten von Herstellern favorisiert.

Neben der Entnahme der eingesetzten Batterien, wurde im Vorfeld der Arbeiten noch ein weiteres, wichtiges Ziel der Untersuchung bestimmt. Dieses bestand in der Feststellung möglicher Synergieeffekte beim Prozess der Entnahme der Batterien aus den Altgeräten. Synergieeffekte sind im Sinne dieser Untersuchung immer dann gegeben, wenn bei der Entnahme der Zellen zusätzliche Komponenten, Bauelemente oder Baugruppen zugänglich werden, die Gehalte an ressourcenrelevanten Metallen aufweisen, und welche sich dann leicht quasi als „Beifang“ mitseparieren lassen.

Als „zusätzlich zugängliche“ Komponenten im Sinne dieser Synergie wurden im Rahmen dieser Untersuchung alle die auftretenden Teile oder Komponenten definiert, die entweder bereits bei der Entnahme der Batterien ohne weitere Arbeitsschritte aus dem Altgerät entnehmbar waren, oder mit „vertretbarem“ Zeit- und Arbeitsaufwand entnommen

werden konnten. Ein vertretbarer Zeitaufwand wiederum war im Rahmen dieser Untersuchung gegeben, wenn die Zeit und der Aufwand zur Demontage der Komponenten mit RePro-Metallen entweder geringer oder nur sehr wenig mehr als die Zeit der Entnahme der eingesetzten Zellen betrug.

Als potenziell zu erwartende Bauelemente oder Komponenten, die einen Inhalt dieser Elemente erwarten lassen, wurden bereits im Vorfeld

- Platinen,
- Lautsprecher und
- Elektromotoren

identifiziert.

6.6.5.1 Identifizierung und Auswahl der untersuchten Geräte

Die Auswahl der sinnvollerweise zu untersuchenden Gerätetypen wurde im Vorfeld der Untersuchungen auf Basis der Liste der 30 ausgewählten RePro-Geräte (siehe Kapitel 3.4.6, Tabelle 15) getroffen.

Aus dieser wurden diejenigen Geräte zur Untersuchung ausgewählt, von denen bekannt ist bzw. zu erwarten war, dass sie Batterien enthalten. Tabelle 115 gibt die sogenannte „Fahndungsliste“ der zu untersuchenden Gerätetypen der SG 3 und SG 5 wieder.

Aufgrund der begrenzten Untersuchungszeit wurde entschieden, bei der Sammlung von Untersuchungsobjekten nicht ausschließlich die prioritär gesuchten Gerätetypen zu betrachten. Um möglichst viele Geräte behandeln zu können, war geplant, ggf. auch andere Batteriebetriebene Geräte der jeweiligen Sammelgruppe in die Untersuchung aufzunehmen.

Tabelle 115: Erstellte "Fahndungsliste" für Versuch 5 „Synergie der Batterieseparation“

Lfd. Nr.	Geräte
3.1	PC
3.2	Laptop
3.3	Tablet Computer
3.7	Multifunktionsdrucker mit Scanner und Laserdrucker
3.8	Schnurloses Heimtelefon
3.9	Navigationsgerät
3.10	Handy
3.11	Smartphone
3.12	Digitalkamera
3.13	Camcorder/Videokamera
3.15	LCD-Fernseher
3.17	Fernbedienung
3.18	DVD-Spieler

Lfd. Nr.	Geräte
3.19	Tragbare Videospiele
3.20	Videospielkonsole
3.21	MP3 Player
5.1	Elektro-Werkzeuge (batteriebetrieben)
5.2	Anzeige- und Kontrollgeräte (batteriebetrieben)
5.3	Elektrische Kleingeräte (batteriebetrieben)

6.6.5.2 Einteilung der ausgewählten Geräte nach Einbausituation der Batterien

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Gerätetypen und Modelle herzustellen, wurde nach Merkmalen gesucht, die den Prozess der Batterieentnahme unabhängig von den restlichen Geräteeigenschaften maßgeblich beeinflussen. Eine Gruppierung der zu untersuchenden Gerätetypen im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund dieser Merkmale sollte zum einen eine möglichst vollständige Abbildung der zuvor erstellten Geräteliste gewährleisten sowie gleichzeitig die unterschiedlichen Aufbauten und Designs der unterschiedlichen Gerätetypen berücksichtigen.

Es wurde daher entschieden, die sogenannte „Einbausituation“ der enthaltenen Batterien als Grundlage für eine Einteilung der Geräte zu wählen. Mit dem Begriff Einbausituation soll hier die Technik der Integrierung der eingesetzten Batterien im Gerät sowie die Art der Zugänglichkeit zu diesen beschrieben werden.

Es wurden 6 unterschiedliche Einbausituationen bei den zu untersuchenden Geräten identifiziert und näher betrachtet:

6.6.5.3 Einbausituation „Klappdeckel“

Diese Einbausituation beschreibt den Einsatz eines Deckels, der es ermöglicht, das Batteriefach von außen ohne den Einsatz von Werkzeugen zu erreichen. Durch diese Technik ist gewährleistet, dass der Nutzer des Gerätes ohne viel Aufwand die enthaltenen Batterien austauschen kann. Geräte, die typischerweise einen Klappdeckel aufweisen, sind z. B. Computermäuse, aber auch zahlreiche andere Gerätetypen (Abbildung 153).

Abbildung 153: Darstellung einer typischen Einbausituation „Klappdeckel“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.4 Einbausituation „Schiebeklappe“

Diese Einbausituation beschreibt den Einsatz einer Schiebeklappe, die es (wie bereits bei der Einbausituation „Klappdeckel“) ermöglicht, das Batteriefach von außen ohne den Einsatz von Werkzeugen zu erreichen. Durch diese Technik ist gewährleistet, dass der Nutzer des Gerätes ohne viel Aufwand die enthaltenen Batterien austauschen kann. Geräte, die typischerweise eine Schiebeklappe aufweisen, sind z. B. Fernbedienungen, aber auch zahlreiche andere Gerätetypen (Abbildung 154).

Abbildung 154: Darstellung einer typischen Einbausituation „Schiebeklappe“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.5 Einbausituation „Gehäuseschale“

Diese Einbausituation beschreibt eine Technik, bei der das Batteriefach bzw. die enthaltenen Batterien erreicht werden können, indem das äußere Gehäuse des Gerätes geöffnet wird. Auch bei dieser Einbausituation ist ein Einsatz von Werkzeugen meist nicht notwendig, um an die enthaltenen Batterien zu gelangen. Durch diese Technik ist ebenfalls gewährleistet, dass der Nutzer des Gerätes ohne viel Aufwand die enthaltenen Batterien austauschen kann. Geräte, deren Batterien typischerweise hinter einer Gehäuseschale erreichbar sind, sind z. B. Handys, aber auch einige andere untersuchte Gerätearten wie z. B. kleine Solarbeleuchtungen für den Gartenbereich (Abbildung 155).

Abbildung 155: Darstellung einer typischen Einbausituation „Gehäuseschale“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.6 Einbausituation „Geclipt“

Diese Einbausituation beschreibt eine Technik, bei der zumeist eine Batterie von außen in das Gehäuse eingesteckt und durch eine Clip-Technik arretiert wird. Auch bei dieser Einbausituation ist ein Einsatz von Werkzeugen meist nicht notwendig, um an die Batterie zu gelangen. Durch diese Technik ist ebenfalls gewährleistet, dass der Nutzer des Gerätes ohne viel Aufwand die enthaltenen Batterien austauschen kann. Geräte, die typischerweise Batterien mit Clip-Befestigung aufweisen, sind z. B. Laptops oder elektrische Werkzeuge wie z. B. Akkuschrauber (Abbildung 156).

Abbildung 156: Darstellung einer typischen Einbausituation „Geclipt“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.7 Einbausituation „Verschraubt“

Diese Einbausituation beschreibt eine Technik, die meist nahezu identisch aufgebaut ist wie ein Klappdeckel oder eine Schiebeklappe. Der Unterschied besteht hier darin, dass diese Abdeckung zur Sicherung der Batterien zusätzlich noch mit einer Verschraubung gesichert ist. Auch hier können die enthaltenen Batterien, ohne erheblichen Aufwand zu betreiben, von außen erreicht werden. Allerdings ist bei dieser Einbausituation der Einsatz eines Schraubendrehers als Werkzeug unerlässlich, um an die enthaltenen Batterien zu gelangen. Durch diese Technik ist trotz der erhöhten Sicherung durchaus gewährleistet, dass der Nutzer des Gerätes die enthaltenen Batterien austauschen kann. Geräte, die typischerweise eine Einbausituation der Zellen unter Einsatz einer verschraubten Abdeckung aufweisen sind z. B. Taschenrechner, aber auch zahlreiche andere Gerätetypen (Abbildung 157).

Abbildung 157: Darstellung einer typischen Einbausituation „Verschraubt“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.8 Einbausituation „Innenlage“

Diese Einbausituation beschreibt eine Technik, bei der die enthaltenen Batterien im Inneren des Gerätes verbaut sind. Bei Geräten, die diese Einbausituation aufweisen, ist es von Seiten des Herstellers nicht vorgesehen, dass der Nutzer die Batterie während der Nutzungsphase des Gerätes austauscht. Meist sind die verbauten Zellen zusätzlich zur Situation der Innenlage durch Verklebungen oder Einlöten der Anschlüsse erheblich gegen einen Ausbau oder Austausch der Zellen gesichert. Geräte, die typischerweise Batterien im Inneren des Gerätes ohne Möglichkeit einer leichten Zugänglichkeit von außen aufweisen, sind z. B. Tablet-Computer, aber auch Kleingeräte wie z. B. elektrische Zahnbürsten (Abbildung 158).

Abbildung 158: Darstellung einer typischen Einbausituation „Innenlage“



Quelle: Ökopol GmbH

6.6.5.9 Ablauf der Untersuchungen

Die ELPRO GmbH betreibt am Standort, an dem die vorliegende Untersuchung durchgeführt wurde, eine rein manuelle Zerlegung von EAG. Diese ist aufgebaut aus unterschiedlichen Arbeitsplätzen, an denen teilweise nur bestimmte, spezialisierte Arbeitsschritte vollzogen werden, wonach die Altgeräte einer weiteren Demontage zugeführt werden.

An einem dieser Arbeitsplätze werden Altgeräte, von denen bekannt ist, dass sie potenziell Schadstoffe oder auch Batterien enthalten aussortiert und weiteren Maßnahmen zugeführt.

An diesem Arbeitsplatz wurden zur Durchführung der Untersuchung aus dem Laufenden Regelbetrieb der Anlage zunächst alle Batterie enthaltenden Altgeräte in einer Gitterbox gesammelt. Aus dieser Sammlung wurden dann im nächsten Schritt die Geräte, die zur Untersuchung herangezogen werden sollten aussortiert.

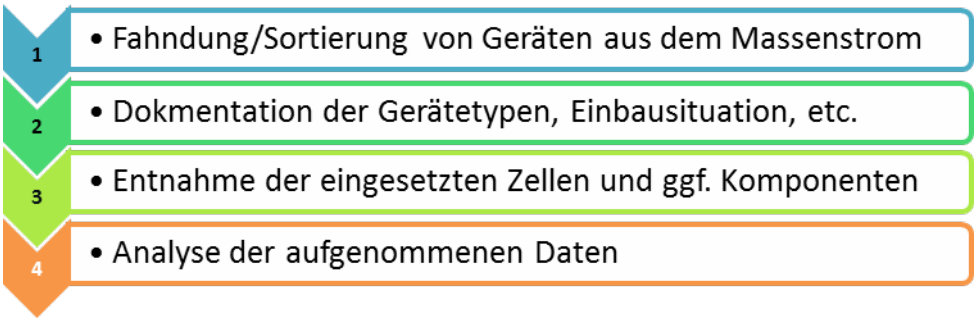
Von den aussortierten Altgeräten wurden dann Chargen der gewünschten Gerätetypen (vgl. Fahndungsliste Tabelle 115) zusammengestellt und die interessanten Daten hinsichtlich der Einbausituation sowie Hersteller- und Modelldaten dokumentiert und Fotos der Geräte erstellt.

Diese dokumentierten Altgeräte wurden dann wieder innerhalb der verschiedenen Gerätetypen gemischt und wiederum einzelne abzuarbeitende Chargen zusammengestellt. Aus dem Team der Zerlegekräfte der ELPRO wurde dann ein erfahrener Mitarbeiter ausgewählt, der die Behandlung übernahm. Diesem wurden dann, wie bereits beschrieben, jeweils kleine Chargen von jeweils ca. 10 dokumentierten Altgeräten unterschiedlicher Gerätetypen gegeben. Der Auftrag der Zerlegekraft war dann, alle in den Geräten enthaltenen Batterien auf dieselbe Art und Weise zu entnehmen, wie es der üblichen Vorgehensweise bei der ELPRO entsprach.

Während der Batterieentnahme wurde dann mit Hilfe einer Stoppuhr die Zeit zur Entnahme der enthaltenen Batterien aufgenommen.

Der Ablauf der Untersuchungen ist in Abbildung 159 nochmals in übersichtlicher Form dargestellt.

Abbildung 159: Ablauf der Untersuchungen



Quelle: eigene Darstellung

Weiterhin war im Vorfeld mit dem Mitarbeiter abgesprochen, dass er, wann immer abzusehen war, dass zusätzliche Komponenten aus dem Gerät ohne Aufwand extrahiert werden konnten, dies anzeigt und dem Zeitaufnehmenden einen Hinweis gibt. Nach einem kurzen Stopp der Zeitaufnahme und einem ggf. notwendigem Gespräch über die weiteren separierbaren Teile, wurden dann auch die Zeiten zur Entnahme dieser aufgenommen. Vielfach entstanden solche Mitnahmeeffekte während der Zellenentnahme auch ohne weitere aufgewendete Arbeitszeit.

Für jedes einzelne so behandelte Elektroaltgerät wurden alle entstandenen Einzelteile inklusive der entnommenen Batterien sowie anderen separierten Komponenten dann jeweils in einer einzelnen Sammelbox für die spätere Analyse aufgehoben.

Außerdem wurde durch den Zeitaufnehmenden zusätzlich ein Demontageprotokoll erstellt, in dem alle wichtigen und interessanten Daten dokumentiert wurden.

Folgende Daten wurden zu jeder Batterieentnahme festgehalten:

- Hersteller und Modell des Gerätes
- Gewicht des Gerätes
- Demontageebene der enthaltenen Zellen
- Einbausituation der Zellen
- Notwendige Werkzeuge und Hilfsmittel
- Zeit zur Entnahme der eingesetzten Zellen
- Anzahl der enthaltenen Zellen
- Typ der enthaltenen Zellen
- Elektrische Kennwerte der enthaltenen Zellen
- Verbindungstechnik der eingesetzten Zellen innerhalb des Gerätes
- Möglichkeit zu zerstörungsfreien Entnahme der eingesetzten Zellen
- Synergieeffekte bei der Entnahme der eingesetzten Zellen
- Funktion der enthaltenen Zellen

6.6.5.10 Ergebnisse der Untersuchung

Innerhalb des Untersuchungszeitraumes konnte die Bearbeitung von insgesamt 124 Elektroaltgeräten einschließlich Dokumentation und Analyse der aufgenommenen Daten durchgeführt werden.

Dabei konnten bis auf 5 Gerätetypen der „Fahndungsliste“ (Tabelle 115) alle gewünschten Geräte untersucht werden. Zusätzlich zu den geplanten Geräten wurden daher diese Lücken durch einige andere Gerätetypen aufgefüllt. Hierdurch konnte die Bandbreite der untersuchten Geräte weiter erhöht werden und die Lücken durch die nicht behandelten ausgeglichen werden. Die zusätzlich aufgenommenen Geräte entsprachen dabei entweder dem Aufbau und der Funktion anderer Gerätetypen der Fahndungsliste, oder wurden aufgrund der Annahme, dass sie Lithium-Ionen-Batterien enthalten, ausgewählt. So wurde z. B. auch ein E-Book Reader, der vom Aufbau den Tablet-Computern sehr ähnelte und 2 Funkgerätetypen, die hinsichtlich des Inhaltes von eingebauten Zellen interessant waren, mit untersucht.

Die Anzahl der untersuchten Geräte und Modelle in den verschiedenen Gerätekategorien ist in Tabelle 116 wiedergegeben.

Tabelle 116: Liste der untersuchten Altgeräte

Geräte der SG 3	Nr.	Anzahl der untersuchten Altgeräte	Anzahl unterschiedlicher Modelle	Geräte der SG 5	Nr.	Anzahl der untersuchten Geräte	Anzahl unterschiedlicher Modelle
PCs	3.1	5	3	Elektro-Werkzeuge (batteriebetrieben)	5.1	5	5
Laptops	3.2	11	5	Anzeige- und Kontrollgeräte (batteriebetrieben)	5.2	5	2
Tablet Computer	3.3	11	1	Elektrische Kleingeräte (batteriebetrieben)	5.3	27	27

Geräte der SG 3	Nr.	Anzahl der unter-suchten Altgeräte	Anzahl unter-schied-licher Modelle	Geräte der SG 5	Nr.	Anzahl der unter-such-ten Geräte	Anzahl unter-schied-licher Modelle
Multifunktions-drucker mit Scanner und Laserdrucker	3.7	0	0			37	
Schnurloses Heimtelefone	3.8	10	5				
Navigations-geräte	3.9	2	1				
Handys	3.10	10	10				
Smartphones	3.11	0	0				
Digitalkameras	3.12	1	1				
Analoge Fotokameras		3	3				
Analoge Videoka-meras	3.13	3	3				
LCD-Fernseher	3.15	0	0				
Fernbedienungen	3.17	10	9				
DVD-Spieler	3.18	1	1				
Tragbare Video-spiele	3.19	0	0				
Videospiel-konsole	3.20	0	0				
MP3 Player	3.21	1	1				
Funkgeräte		3	2				
Funk-Kopfhörer		2	2				
Funk-Tastaturen		3	2				
Funk-Mäuse		5	5				
Organizer (PDA)		1	1				
Radiowecker		2	1				
Scanner		2	1				
E-Book Reader		1	1				

Geräte der SG 3	Nr.	Anzahl der untersuchten Altgeräte	Anzahl unterschiedlicher Modelle	Geräte der SG 5	Nr.	Anzahl der untersuchten Geräte	Anzahl unterschiedlicher Modelle
Summe untersuchte Geräte SG 3/SG 5		**87**				**37**	
Gesamtsumme untersuchte Geräte						**124**	

6.6.5.10.1 Einbausituation bei den untersuchten Geräten

Innenlage

Betrachtet man die Ergebnisse hinsichtlich der Einbausituation, stellt man fest, dass sich die Batterie bei den meisten Geräten der Untersuchung in der Einbausituation Innenlage (43 %) befand. Meist waren die Batterien bei diesen Altgeräten in Lithium-Ionen-Technik ausgeführt.

Aufgrund der teilweise enormen Inhomogenität von Gerätetypen in auftretenden Chargen der SG 3 und SG 5 konnte innerhalb der Untersuchungszeit nicht gewährleistet werden, dass alle Geräte der zuvor definierten Liste näher betrachtet werden konnten. Anstelle dieser fehlenden Geräte wurden im Laufe der Sammlung andere Gerätetypen ausgewählt, die den Einsatz von Li-Ionen-Zellen oder zumindest einen Batterieeinsatz vermuten ließen. Der hohe Anteil der Geräte mit Li-ionen-Batterien in der Untersuchung, lässt sich somit darauf zurückführen, dass gezielt darauf hingearbeitet wurde. Die ermittelten Anteile können daher nicht als Indikator für die Häufigkeit eines bestimmten Batterietyps innerhalb der verschiedenen Sammelgruppen angesehen werden.

Genannte Gründe führten weiterhin auch dazu, dass in dieser Untersuchung viele relativ hochwertige Geräte aus dem Bereich der IT und Telekommunikationstechnik untersucht wurden und eine hohe Anzahl der analysierten elektrischen Kleingerätetypen dem Bereich der Unterhaltungselektronik zuzuordnen sind. So wurde z. B. eine erhöhte Anzahl an mobilen Bildschirmgeräten verschiedener Art (Laptop, Tablet Computer, E-Book Reader usw.) untersucht. Bei dieser Art von tragbaren Geräten der Unterhaltungselektronik ist erfahrungsgemäß davon auszugehen, dass es aus technischen Gründen vom Hersteller nicht vorgesehen ist, die Batterie während der Nutzungsphase auszutauschen. Oftmals ist hier ein Austausch der Zellen im Innern nahezu unmöglich, ohne Schaden am Gerät zu hinterlassen. Diese Situation wird weiterhin noch durch zahlreiche konstruktive Maßnahmen, wie z. B. das Verkleben der Batterie, oder eine besonders geschützte Lage hinter anderen Baugruppen verschärft. Oftmals gilt dies sowohl für den Nutzer des Gerätes, als auch für die Möglichkeiten der einschlägigen Reparaturwerkstätten.

Bei vielen elektrischen Kleingeräten des Haushaltsbereichs werden ebenfalls sehr häufig Batterien in Innenlage eingesetzt. Bei diesen Geräten ist der Grund für diese Einbausituation meist im besonderen Schutz des Gerätes und des Nutzers zu suchen. So sind z. B.

die Batterien der untersuchten Zahnbürsten und Rasierapparate besonders vor dem Eindringen von Flüssigkeiten oder anderen Fremdstoffen geschützt.

Einen weiteren, recht hohen Posten der aufgefundenen Batterien in Innenlage, bilden in Form von Knopfzellen die sogenannten Puffer- oder Speicherzellen, die z. B. auf den Mainboards der untersuchten PCs, Laptops und anderen Geräten mit Speicherfunktion eingesetzt werden. Wichtig ist, dass diese Pufferzellen grundsätzlich besonders vor äußeren Fremdeinwirkungen (Flüssigkeitseintritt, starken Vibrationen, Manipulationen durch den Nutzer oder andere Personen) geschützt sind, um die einwandfreie Funktion des Gerätes in jeder Situation zu gewährleisten.

Klappdeckel und Clip-Technik

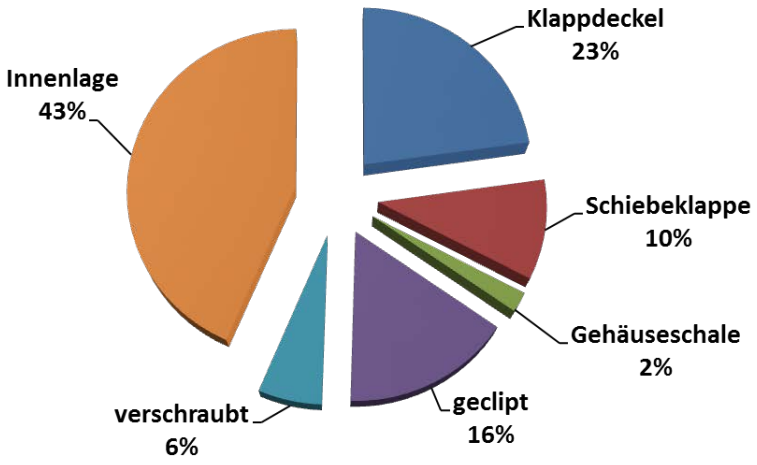
Nach der am häufigsten angetroffenen Innenlage (43 %), sind die Einbausituationen Klappdeckel (23 %) und die Clip-Technik (16 %) der zweitgrößte Bereich innerhalb der untersuchten Gerätetypen. Während beim Klappdeckel zu bemerken ist, dass diese Technik aufgrund des einfachen Aufbaus für recht viele Geräte favorisiert wird, resultiert der hohe Anteil der Clip-Technik direkt aus dem hohen Anteil der Laptops in der Untersuchung, bei denen standardmäßig eine von außen geclipte Batterie zur Energieversorgung eingesetzt wird.

Weitere Einbausituationen

Neben diesen hohen Anteilen der eben beschriebenen Einbausituationen teilt sich der Rest der untersuchten Geräte auf die Schiebeklappen (10 %), Batteriefächer mit Verschraubungen (6 %) und Geräte mit der Einbausituation Gehäuseschale (2 %) auf.

Die Aufteilung der untersuchten Geräte hinsichtlich der Einbausituation ist Abbildung 160 zu entnehmen.

Abbildung 160: Aufteilung der untersuchten Geräte nach Einbausituation



Quelle: eigene Darstellung

6.6.5.10.2 Ermittelte Zeiten zur Entnahme der enthaltenen Batterien

Es war zu erwarten, dass sich die Einbausituation auch auf die notwendige durchschnittliche Demontagezeit der Batterien auswirkt. Dies ist eindeutig durch die aufgenommenen Zeiten bestätigt worden.

So ist den gemessenen Werten zu entnehmen, dass die Zeiten zur Entnahme von Batterien in „Innenlage“ mit durchschnittlich 16,8 s den Höchstwert darstellen. Dies resultiert zum einen aus der Tatsache, dass die jeweiligen Geräte zur Entnahme der Batterien aufwendig geöffnet werden müssen und die Batterien häufig sehr fest eingebaut sind.

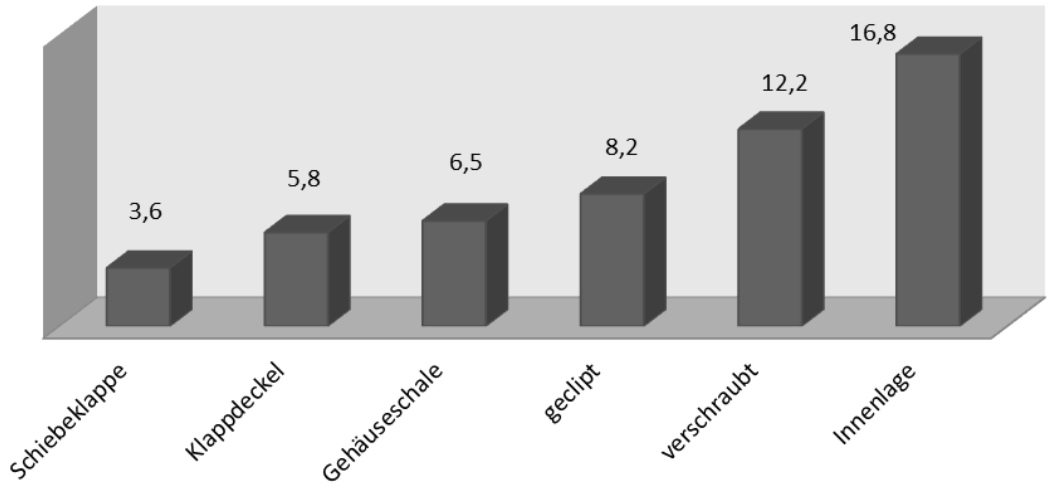
Ein anderer wichtiger Faktor hierbei ist aber auch die oftmals unbekannte Lage der Batterien im Inneren des Gerätes. So kann z. B. der Aufbau von Laptops selbst hinsichtlich des technischen Designs einer Modellreihe desselben Herstellers variieren. Häufig ist hier die Größe und das Format des eingesetzten Displays als einer der Treiber für Design-Variationen der unterschiedlichen Modelle einer Baureihe anzusehen. Es erfordert daher gut geschulte, erfahrene und mit Bedacht arbeitende Zerlegekräfte, um die verborgenen Lithium-Knopfzellen (Pufferzellen) im Inneren mancher Gerätetypen innerhalb einer geringen Zeit zu lokalisieren und zu entnehmen.

Etwas überraschend war das Ergebnis der Untersuchung, dass die Batterien in Clip-Technik mit einer durchschnittlichen Demontagezeit von 8,2 s an dritter Stelle der höchsten Entnahmezeiten angesiedelt sind. Besteht der Charme dieser Technik während der Nutzungsphase des Geräts zum großen Teil darin, die Batterie mit nur wenigen Handgriffen und ohne Werkzeug durch den Nutzer leicht lösen zu können, stellte sich die „Clip-Technik“ als nicht sehr demontagefreundlich bei der EAG-Behandlung heraus. Während bei dieser Technik natürlich die leichte Lokalisierung der Zellen einen Vorteil bildete, müssen diese Batterien hier auf der anderen Seite technisch besonders gegen ein ungewolltes Lösen während der Benutzung geschützt sein, was die Entnahmezeit wiederum erhöht. Während der Untersuchung stellte sich bei der Entnahme von Batterien, die mittels der für die Nutzer so praktischen „Clip-Technik“ im Gerät integriert waren, heraus, dass der bei der Batterieentfernung sonst übliche Einsatz von Schraubendreher oder Hammer zur gewaltsamen Lösung der Arretierungen, häufig zu Komplikationen und deutlich verlängerten Entnahmezeiten führte. Die bestimmungsmäßige Benutzung der Befestigungstechnik (sprich: das einzelne Lösen der vorhandenen Clips mit der Hand), erwies sich bei den behandelten Geräten letztendlich meist als die beste Lösung. Aufgrund der eingeschränkten Fingerfertigkeit, bedingt durch die eingesetzten Schutzhandschuhe, bedeutet dies in der Praxis einen Werkzeugwechsel und eine damit einhergehende Erhöhung der Entnahmezeit.

Die Gerätetypen mit der Einbausituation Klappdeckel und Schiebeklappe wiesen durchschnittlich die geringsten Entnahmezeiten der Untersuchung auf. Dies liegt naturgemäß daran, dass diese Techniken gerade dafür entwickelt wurden, eine Entnahme bzw. den Austausch der Batterien möglichst leicht und unkompliziert zu realisieren. Bei den meisten kleineren Geräten mit dieser Technik wurde daher noch nicht einmal Werkzeug zur Entnahme der Batterien eingesetzt. Ein gezielter, intensiver Schlag des Gerätes auf die Arbeitsfläche oder die Tischkante genügte häufig zum Lösen der Befestigungen, sodass Batteriefach und Zellen innerhalb eines Sekundenbruchteils separat vorlagen.

Die Darstellung in Abbildung 161 gibt die berechneten ermittelten Entnahmezeiten der Zellen mit Bezug zur jeweiligen Einbausituation wieder.

Abbildung 161: Durchschnittliche Zeit zur Entnahme der Batterien je nach Einbausituation



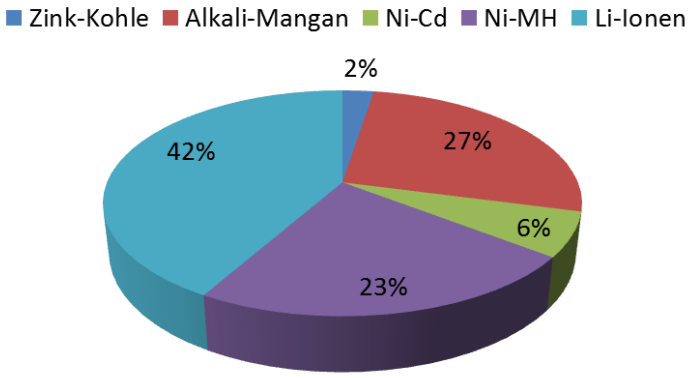
Quelle: eigene Darstellung

6.6.5.10.3 Eingesetzte Zelltechniken in den untersuchten Geräten

Das primäre Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, die Entnahme von Lithium-Ionen-Batterien aus Geräten der SG 3 SG 5 zu dokumentieren und analysieren. Da jedoch während der Phase der Sammlung von Untersuchungsobjekten keine der beteiligten Personen genau abschätzen konnte, ob in den Altgeräten tatsächlich Lithium-haltige Batterien eingesetzt waren, wurde der Schwerpunkt der Untersuchung zunächst allgemeiner auf alle potenziell batteriehaltigen Altgeräte gelegt. Aus dieser Sammlung wurden dann wiederum die interessanten und zur Untersuchung gewünschten Gerätetypen ausgewählt.

Die folgende Abbildung 162 gibt die Aufteilung der aus den untersuchten Geräten entnommenen Batterietypen wieder.

Abbildung 162: Aufteilung der entnommenen Batterietypen



Quelle: eigene Darstellung

Lithium-haltige Batterien

Lithium-Ionen-Batterien gegenüber der Verwendung anderer Batterietypen besonders beim Einsatz in mobilen Geräten einige Vorteile. Besonders ist dies bei den Batterien in Innenlage zu erwähnen. Da diese in den Geräten meist nicht zugänglich und austauschbar sind, ist es hier besonders wichtig, dass auf kleinem Bauraum eine hohe Energiedichte erreicht wird und die Batterien über eine lange Zeit keine Ermüdungserscheinungen aufweisen. Diese zwei wichtigen Faktoren können zum heutigen Stand der Technik optimal durch Lithium-Ionen-Batterien und aufgrund der Möglichkeit einer höchsteffizienten Bauraumnutzung vor allem durch den Einsatz von Lithium-Polymer-Batterien realisiert und gewährleistet werden. Daher konnten aus den meisten Geräten der Untersuchung (42 %) Lithium-Ionen-Zellen extrahiert werden.

Aufgrund dieses Schwerpunktes wurde zudem untersucht in welchen Bauformen Lithium-Ionen-Batterien vorlagen und wie aufwändig deren Entnahme war. Zunächst ist hierzu festzustellen, dass Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Batterien in der Untersuchung fast ausschließlich in den mobilen Geräten entdeckt wurden. Lediglich in den untersuchten Desktop-PCs fanden sich ebenfalls Lithium-Ionen-Pufferzellen in Knopfzellenbauform auf den Motherboards.

Des Weiteren konnten zahlreiche unterschiedliche Batteriepack-Konfigurationen einzelner Lithium-Zellen dokumentiert werden. Auch Lithium-Ionen-Batteriepacks mit einer festen Gehäuseschale, die in Cliptechnik (Laptop) oder auch Gehäuseschalen-Technik (Handy, Kameras) eingesetzt waren, konnten in verschiedenen Größen und Erscheinungsformen separiert werden.

Die folgende Tabelle 117 gibt einen Überblick über die Gerätetypen, bei denen während der Untersuchung Lithium-Ionen-Zellen extrahiert wurden und zeigt auf, in welcher Form diese vorlagen.

Tabelle 117: Geräte und Bauformen der entnommenen Lithium-Ionen-Zellen

Gerätetyp	Bauform(en) der entnommenen Lithium-haltigen Batterien
Digitalkameras	CR 17345
Handys	Herstellerspezifischer Aufbau der Batterie
DVD-Spieler	Gerätespezifischer Batteriepack
Funk-Mäuse	Herstellerspezifischer Batteriepack
MP3 Spieler	Gerätespezifischer Batteriepack
Navigationsgeräte	Herstellerspezifischer Batteriepack
Desktop-PCs	CR 2032
Laptops	Herstellerspezifischer Batteriepack, CR 2032
Tablet Computer	Gerätespezifischer Batteriepack
E-Book Reader	Gerätespezifischer Batteriepack
Scanner	Herstellerspezifischer Batteriepack
Taschenlampen	Gerätespezifischer Batteriepack

Betrachtet man den Querschnitt der extrahierten Bauformen aller separierten Batterien der Untersuchung, so lässt sich sagen, dass in den Geräten der Untersuchung Batterien in nahezu allen handelsüblich erhältlichen Bauformen vertreten waren. Dies verdeutlicht nochmals die heutzutage bereits hohe Verbreitung von Lithium-Ionen-Technik in vielen Bereichen, in denen vormals vorrangig andere Zelltypen eingesetzt wurden.

Aufgrund der guten Verfügbarkeit und den heute recht moderaten Preisen für den Einsatz von Lithium-Ionen-Technik ist außerdem für den Nutzer der Geräte oder andere Personen jederzeit die Möglichkeit gegeben, ein vormals mit z. B. Nickel-Cadmium- oder Nickel-Metallhydrid-Zellen bestücktes Batteriefach mit Lithium-Ionen-Zellen auszurüsten. Somit ist eine Einschätzung der eingesetzten Batterietechnik bei den verschiedenen Gerätetypen vom äußeren Anschein her nicht möglich.

Weitere Batterietypen

Den zweitgrößten Anteil bilden die Alkali-Mangan-Batterien, meist in der sehr verbreiteten sogenannten gängigen Bauform AA oder AAA. Diese galvanischen Zellen gehören mit zu den wichtigsten elektrochemischen Energiespeichern im Bereich der Primärelemente. Sie sind aufgrund des geringen Preises und der guten Verfügbarkeit in einem Großteil der batteriebetriebenen Geräte zu finden, und somit auch in den Geräten der Untersuchung eingesetzt.

Mit 23 % Anteil an den gesamten gefundenen Batterien, bilden die Nickel-Metallhydrid-Batterien den nächsten großen Block. Diese Batterietypen realisieren in den handelsüblichen Bauformen ebenfalls höhere Energiedichten als z. B. Alkali-Mangan-Zellen, enthalten jedoch, im Gegensatz zu Nickel-Cadmium-Zellen, geringere Schadstoffinhalte. Nach den Nickel-Metallhydrid-Zellen bilden die Nickel-Cadmium-Zellen mit 6 % und die Zink-Kohle-Batterien mit 2 % den geringsten Anteil an den aufgefundenen Zellen in den Geräten der Untersuchung. Diese beiden während der Untersuchung entnommenen Zelltypen spiegeln gut die potenzielle Bandbreite des Alters (Baujahres) der anfallenden Zelltypen in EAG der SG 3 und SG 5 wider. Zink-Kohle-Batterien sind schon lange durch leistungsfähigere Zelltypen vom Markt verdrängt worden und der Einsatz von Nickel-Cadmium-Zellen ist ebenfalls bereits seit Ende 2004 durch den Druck entsprechender EU-Richtlinien reduziert worden.

6.6.5.10.4 Zerstörungsfreie Entnahme der eingesetzten Batterien

Gleichgültig welcher Zelltyp in einem EAG auch enthalten ist, eine Beschädigung der Batterien vor oder während des Entnahmeprozesses sollte weitestgehend vermieden werden. Dies bedeutet in der Praxis des Vorbehandlers der Geräte immer zumindest eine Verschmutzung des Materials, der Betriebsmittel und der Außenanlagen. Unangenehme Anreicherungen von austretenden Elektrolyten und austretende Gefahrstoffe wie Quecksilber, Cadmium oder Blei aus beschädigten Batterien stellen zudem schnell eine signifikante Gefährdung für die Gesundheit der Mitarbeiter der Behandlungsbetriebe dar, kontaminieren Betriebsmittel und Anlagenteile und schädigen die Umwelt.

Aufgrund der besonderen Gefahr durch die hohe Reaktionsfreudigkeit von Lithium bei Zerstörung der Zellen während der Entnahme, wurde während der Untersuchung besonderer Wert auf die möglichst vollständig zerstörungsfreie Entnahme dieser gelegt. Diese Maßgabe entspricht, allein schon aus Gründen des vorbeugenden Brandschutzes, der üblichen Vorgehensweise und angewendeten Arbeitsanweisung bei der ELPRO

GmbH und anderen manuellen Zerlegeeinrichtungen und Erstbehandlungsanlagen für EAG.

Neben der reinen Feststellung, ob die Zellen bei der Entnahme unbeschädigt geblieben sind, wurde während der Untersuchung auch verstärkt auf Indizien zur Einschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Zerstörung der Zellen bei der Entnahme geachtet. Folgende Faktoren, die eine Zerstörung der Zellen bei Anwendung der üblichen Entnahmeprozesse maßgeblich begünstigen, konnten durch die Untersuchungen festgestellt werden:

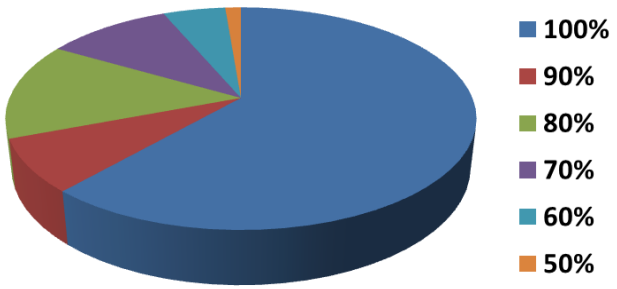
- Einbausituation Innenlage,
- Einsatz von nichtlösbaren Verbindungen zur restlichen Elektronik (z. B. Verlötung),
- Übermäßiger Einsatz von Kleber oder ähnlichem zur Sicherung der Zellen,
- Fehlende Daten und fehlendes Wissen hinsichtlich des Aufbaus der Geräte und der eingesetzten Zellen,
- Einsatz von Batteriepacks in sehr kleinen, schmalen Geräten oder in unzugänglichen Gehäusegeometrien.

Vor dem Hintergrund dieser Faktoren wurde im Folgenden für jede der vorgefundenen Entnahmesituationen eine Einschätzung zur Wahrscheinlichkeit der zerstörungsfreien Entnahme der Zellen angestellt. Eine Angabe einer Wahrscheinlichkeit von 100 % bedeutet im Rahmen dieser Untersuchung demnach, dass davon auszugehen ist, dass die Batterien bei fachgerechter Entnahme nicht zerstört werden. Eine Angabe von 50 % Zerstörungswahrscheinlichkeit besagt somit, dass in jedem zweiten Fall bei der Entnahme mit einer Zerstörung der Zellen zu rechnen ist.

Diese schlechteste Bewertung beruht meist auf der Tatsache, dass die Lokalisierung der Zellen z. B. durch eine unbekannte Innenlage erschwert war. Ein weiterer Faktor, der hier eine Rolle spielt, ist natürlich auch die Tatsache, dass bei einer manuellen Zerlegung fast durchweg eine gerätezerstörende Entnahme z. B. durch das grobe Aufschlagen des Gerätegehäuses erfolgt. Die Wahrscheinlichkeit, hierbei die innenliegenden Zellen zu treffen, ist dadurch natürlich erhöht. Dies ist besonders bei sehr kleinen Geräten oder auch bei Geräten, die der Zerlegekraft unbekannt sind, der Fall.

Abbildung 163 gibt eine Übersicht über die durch die Zerlegeversuche ermittelten Wahrscheinlichkeiten der zerstörungsfreien Entnahme der enthaltenen Zellen wieder.

Abbildung 163: Zerstörungsfreie Entnahme der Zellen bei den Geräten der Untersuchung



Quelle: eigene Darstellung

6.6.5.10.5 Eingesetzte Werkzeuge und Hilfsmittel während der Untersuchung

Es zeigte sich, dass zur Durchführung der Entnahme aller Zellen der untersuchten Geräte nicht mehr als drei verschiedene Werkzeuge notwendig waren. Die hohen Anforderungen an die Mitarbeiter einer gewerblichen Demontagelinie hinsichtlich der Bearbeitungszeiten eines einzelnen Gerätes führen naturgemäß zum Einsatz eines Allround-Werkzeugs wie z. B. einem Hammer oder etwas Ähnlichem. Demzufolge konnten die Arbeiten mittels des Einsatzes eines Hammers, eines Schraubendrehers sowie eines Akkuschraubers optimal durchgeführt werden. Vielfach kam zudem bei der Behandlung der Geräte, besonders bei den sehr kleinen, gar kein Werkzeug zum Einsatz. Ein präziser Schlag des Gerätes an die Tischkante lieferte häufig die gewünschte Zellenentnahme innerhalb von Millisekunden.

An dieser Stelle drängt sich in der Praxis, neben dem Wunsch der zügigen Bearbeitung der Geräte, unwillkürlich auch der Gedanke an die Anforderung der zerstörungsfreien Entnahme auf. Tatsächlich erhöht der Einsatz grober Werkzeuge zur Öffnung der Geräte die Gefahr der Zerstörung der enthaltenen Zellen besonders bei kleinen Geräten signifikant. Den schmalen Grat zwischen der möglichst schnellen und gleichsam höchst präzisen Bearbeitung der verschiedenen Gerätetypen und Anforderungen betreten auch hier die Mitarbeiter der manuellen Bearbeitungsplätze der Betriebe. Der Erfahrungsschatz und Arbeitseinsatz der Mitarbeiter, die mit der Entnahme von Batterien aus EAG betraut werden, bestimmt somit wieder einmal maßgeblich das Separations- und Betriebsergebnis bei den Prozessschritten der Zellenentnahme.

6.6.5.11 Fazit und Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Untersuchung

Der überwiegende Anteil der Altgeräte innerhalb der Untersuchung war mit Lithium-haltigen Batterien ausgestattet. Häufig wurden diese auch aus Altgeräten extrahiert, bei denen selbst erfahrene Zerlegekräfte der ELPRO GmbH keinen Lithium-haltigen Batterien vermutet hatten. Da im Rahmen der Untersuchung jedoch nur eine kleine, nicht repräsentative Anzahl an Geräten und Gerätetypen untersucht werden konnte, lassen sich somit aus diesem Ergebnis keine haltbaren Rückschlüsse auf die Verteilung der Zellentechniken in der gesamten Sammelgruppe schließen. Tendenziell ist jedoch in beiden Sammelgruppen ein Anstieg der Geräte mit Batteriebetrieb bzw. Inhalt an Batterien festzustellen. Dies scheint auch mit der steigenden Anzahl von mobilen Geräten der Unterhaltungselektronik zu korrelieren.

Einbausituationen, bei denen der Nutzer des Gerätes oder andere Personen befähigt sind, jederzeit einen Wechsel der Batterie vorzunehmen, bieten potenziell die Möglichkeit, jederzeit auch alle angewandten Batterietechniken durch Lithium-Ionen Batterien zu ersetzen. Nicht zuletzt aufgrund der guten Verfügbarkeit und den heute recht moderaten Preisen für den Einsatz von Li-Ionen-Technik, ist es daher zu jeder Zeit möglich, anstatt der üblichen Nickel-Metallhydrid-Batterien innerhalb einer Gerätekategorie plötzlich einen Lithium-Ionen-Batterien in diesen Geräten zu finden. Bei bestimmten Gerätearten und Einbausituationen erscheint eine Einschätzung der eingesetzten Batterietechnik bei verschiedensten Gerätetypen nur aufgrund der äußeren Inaugenscheinnahme, langfristig unmöglich.

Die Lokalisierung und anschließende manuelle Entnahme der anfallenden Batterien innerhalb eines wirtschaftlichen Zeitrahmens erfordert ein zunehmend hohes Maß an Geschick und Erfahrung der Bearbeiter. Eine wenn auch nur grobe Kenntnis des vorliegenden Gerätes, besonders hinsichtlich der Lokalisierung der eingesetzten Batterien, fördert hier erfahrungsgemäß zudem signifikant ihre zerstörungsfreie Entnahme.

Bei den Versuchen kam es mehrfach zu einem Zielkonflikt: Während bei der Batterieentnahme auf deren Unversehrtheit höchsten Wert gelegt werden sollte, zeigte sich hinsichtlich potenziell auftretender Synergieeffekte mit ressourcenrelevanten Komponenten eine möglichst gewaltsame Behandlung der Altgeräte bei der Entnahme als hilfreich. Ein gutes Beispiel hierfür sind die untersuchten Fernbedienungen. Bei diesen wurden exemplarisch die Unterschiede zwischen dem gewaltsamen Öffnen des Altgerätes (bei gleichzeitiger Entfernung der Batterien und weiterer ressourcenrelevanter Komponenten (Leiterplatte) aus dem Gerät) und dem etwas zeitaufwändigeren Öffnen des Batteriefachs mit einem Schraubendreher untersucht.

Hierzu wurden zunächst an 10 Fernbedienungen die schonenden, nicht zerstörenden Entnahmeprozesse durchgeführt. Hierbei entstand aus offensichtlichen Gründen keine Chance, einen Synergieeffekt zu erzielen, da die Produktgestalt der Geräte beim Prozess nahezu überhaupt nicht gelitten hatte oder zerstört worden war, sodass die innenliegende Leiterplatte nicht freigelegt wurde.

Im Gegensatz hierzu, konnte durch das Aufschlagen des Gehäuses mit Hilfe eines Hammers oder einer festen Kante bei einer Vielzahl der Geräte die gleichzeitige Freilegung von Batterie und Platine erreicht werden. Tendenziell lässt sich dieser Effekt von den relativ einfach aufgebauten Fernbedienungen auch auf andere komplexeren Gerätetypen übertragen.

6.6.6 Versuchsübergreifende Aspekte und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts wurde eine Reihe von praktischen Behandlungsversuchen mit verschiedenen EAG der SG 3 und SG 5 durchgeführt. Sofern möglich, wurden die Versuchsergebnisse mit Hilfe von zwei Parametern bewertet: dem Transferkoeffizienten und der Konzentration als Maß für die Verteilung bzw. Anreicherung der ressourcenrelevanten Metalle in den einzelnen Fraktionen.

Bei der Vielfalt der existierenden Behandlungsverfahren (mechanisch und manuell) und der somit möglichen Prozessketten kann eine begrenzte Anzahl von Versuchen mit einer großtechnischen Anlage prinzipiell kein allumfassendes Bild liefern. Es gibt jedoch einige generelle Erkenntnisse, die weitgehend unabhängig sind von den spezifischen Charakteristika einer bestimmten Anlage:

I. Eine Vorkonzentrierung des Inputs durch geeignete Sortierung der EAG vor der Behandlung wirkt sich positiv auf die Konzentrationen im Output aus.

Die Versuchsreihe mit den unterschiedlichen Mischungen von EAG (s. Versuch 1, Kapitel 6.6.1) erlaubt Aussagen über den Einfluss der Zusammensetzung der Sammelgruppen auf die Separationsrate bzw. Aufkonzentrierung der ressourcenrelevanten Metalle. Die Verteilung über die einzelnen Fraktionen wurde durch eine Änderung des Inputs nur geringfügig beeinflusst (Tabelle 102). Der Einfluss auf die Konzentrationen ist hingegen schwieriger zu beurteilen. Hochwertigere Geräte der SG 3 sorgen für höhere Ausgangskonzentrationen im Input, die sich tendenziell auch in den Fraktionen widerspiegeln

(vgl. z. B. Feingut SG 5 mech. (Tabelle 90) und SG 3/SG 5 mech. (Tabelle 92). Darüber hinaus liefern die vorliegenden Daten keine Hinweise auf einen systematischen Einfluss auf die relative Anreicherung bezogen auf die Inputkonzentrationen.

II. Durch eine gezielte Entnahme weitgehend unbeschädigter Platinen kann ein Großteil der ressourcenrelevanten Metalle in dieser Fraktion aufkonzentriert werden. Für bestimmte Elemente kann die Entnahme weiterer Komponenten, wie z. B. Elektromotoren mit seltenerd- oder Co-haltigen Magneten, vorteilhaft sein.

Die Variation der Behandlung der EAG aus SG 3 (Versuche SG 3 mech. und SG 3 mech./man., s. Versuch 1, Kapitel 6.6.1) sowie die Versuche zur manuellen und mechanischen Behandlung von schnurgebundenen Festnetztelefonen (s. Versuch 2, Kapitel 6.6.2) zeigen deutlich den Einfluss des Aufbereitungsschritts „Entnahme großflächiger Platinen“. Durch ein einfaches und sicherlich sehr unvollständiges Aussortieren von Platinen nach der Vorzerkleinerung von EAG der SG 3 konnte eine Fraktion mit einem Massenanteil von lediglich 3,0 % erzeugt werden, die im Vergleich zu den restlichen 97,0 % sehr hohe Konzentrationen der ressourcenrelevanten Metalle enthielt (Tabelle 98). Einzige Ausnahme war Neodym, das im Shreddervormaterial am höchsten konzentriert war. Die gezielte manuelle Zerlegung der Telefone lieferte ein noch deutlicheres Bild: 88,5 % der ressourcenrelevanten Metalle lassen sich durch manuelle Separation der Platinen in einer Fraktion anreichern (Tabelle 108). Bei der mechanischen Behandlung gelangen hingegen 77,3 % in das Feingut, das deutlich niedriger konzentriert ist und einer weiteren Aufbereitung bedarf.

III. Bei der mechanischen Behandlung von EAG sollte der Anteil der erzeugten Feinfraktionen minimiert werden, sofern keine speziellen Prozesse für eine verlustarme Weiterverarbeitung zur Verfügung stehen.

Signifikant für die mechanische Behandlung mit dem Rotorshredder war die Erzeugung von Feingut mit einem Massenanteil von rund 20 % bezogen auf das jeweilige Shreddervormaterial. Wie Versuch 4 mit dem Nasstrenntisch (s. Kapitel 6.6.4) gezeigt hat, muss diese kleinteilige Fraktion zu weiteren Aufkonzentration von RePro-Metallen aufwendig und damit kostenintensiv weiterverarbeitet werden. Je mehr Prozessschritte für die Erzeugung marktfähiger Fraktionen nötig sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für weitere Verluste. Bei relativ geringen Anteilen an ressourcenrelevanten Metallen im Input, z. B. bei Shreddervormaterial von EAG der SG 5, sind die Konzentrationen im Feingut jedoch relativ niedrig, so dass die Verluste weniger stark ins Gewicht fallen.

IV. Für eine gezielte Separation und Anreicherung spezifischer Elemente sind neue Aufbereitungstechnologien und Prozessketten notwendig, die in enger Verknüpfung mit den entsprechenden Rückgewinnungsverfahren zu entwickeln sind.

Eine elementspezifische Separation und Aufkonzentrierung war mit den großtechnischen Aufbereitungsverfahren nicht möglich. Ein Großteil der ressourcenrelevanten Metalle gelangte unabhängig vom Input in die beiden Fraktionen Kunststoff-Metall-Gemisch (K.-M.-G.) und Feingut (s. Versuch 1, Tabelle 102). Bei Versuch 3 zur mechanischen Separation und Anreicherung von Tantal aus Laptop-Unterteilen (s. Kapitel 6.6.3) konnte zwar eine hohe Anreicherung von Tantal erzielt werden, allerdings war der Prozess auch mit extremen Verlusten behaftet.

V. Besonders für nicht-edle Technologiemetalle wird eine parallele Entwicklung von neuen Aufbereitungs- und Rückgewinnungsverfahren benötigt, um technisch und wirtschaftlich funktionierende Prozessketten etablieren zu können.

Grundsätzlich wird jeder kommerziell betriebene Prozess darauf ausgerichtet sein, innerhalb der gegebenen Randbedingungen und Auflagen möglichst hochwertige Fraktionen mit möglichst geringem Aufwand zu generieren. Entsprechend sind die Prozesse auf die Ausbringung von Metallen und Fraktionen optimiert, für die aktuell eine hohe Vergütung zu erzielen ist und die in relevanten Mengen in EAG vorhanden sind. Die bedeutendsten Fraktionen aus unternehmerischer Sicht sind daher Fe-, Al- und Cu-Schrotte. Darüber hinaus entsteht ein zusätzlicher Wert durch Nebenmetalle, die metallurgisch kompatibel sind mit den drei genannten Hauptmetallen. Wichtigstes Beispiel sind die Edelmetalle (im Projektkontext Au, Ag, Pd), die für eine deutliche Aufwertung der Cu-Schrotte sorgen.

Diesem Marktprinzip folgend ist die Verfügbarkeit von spezialisierten metallurgischen Prozessen Grundvoraussetzung für neue Aufbereitungsverfahren, da nur so eine Chance auf gewinnbringende Vermarktung besteht. Auf der anderen Seite wird ein neuer Rückgewinnungsprozess nur dann großtechnisch umgesetzt, wenn ausreichende Stoffströme als Input zur Verfügung stehen.

VI. Eine systematische Bereitstellung von Demontageinformationen und Inhaltsstoffen durch die Gerätehersteller, zugeschnitten auf die Bedürfnisse der Recyclingbetriebe, könnte die Qualität und Quantität des Recyclings verbessern. Umgekehrt könnte eine Rückkopplung durch die Recyclingbetriebe hilfreich sein, um besonders ungeeignete Konstruktionen in Zukunft zu vermeiden.

Viele der ressourcenrelevanten Metalle sind in bestimmten Komponenten oder Bauteilen lokalisiert und liegen dort bereits in hohen Konzentrationen vor (vgl. Kapitel 3.3). Es ist also naheliegend, mit konstruktiven Maßnahmen für eine gute Entnehmbarkeit dieser Geräteteile zu sorgen, egal ob manuell oder mechanisch. Der Rahmen für solche Maßnahmen ist sicher eng gesteckt, da viele andere Anforderungen an ein elektronisches Gerät mit höherer Priorität im Lastenheft stehen, aber schon durch die Vermeidung von technisch unnötigen Erschwernissen für die Demontage könnte im Einzelfall einiges erreicht werden. Tiefgreifende Änderungen erfordern hingegen einen systematischen Ansatz, wie er z. B. in den „10 Regeln für recyclinggerechtes Design“ niedergeschrieben ist (van Schaik et al. 2013). Zu den Forderungen gehört dabei auch die Bereitstellung von Informationen zu Aufbau und Inhalt von Geräten in einer Form und Detaillierung, wie sie für ein optimiertes Recycling nötig sind. Prinzipiell hat jeder Betrieb zur Behandlung von Elektroaltgeräten eine gewisse Kenntnis über Aufbau und Inhalt der EAG, da nur so ein gewinnbringendes Geschäft realisiert werden kann. Allerdings handelt es sich dabei oft nur um Erfahrungswerte von Einzelpersonen oder Personengruppen, die durch den täglichen Umgang mit den EAG entstanden sind, sozusagen tradiertes Wissen innerhalb eines Unternehmens.

VII. Eine Kennzeichnung von Komponenten und Bauteilen wäre hilfreich für eine schnelle Einordnung und Bewertung und könnte im Idealfall sogar automatisierte Sortierprozesse ermöglichen.

In der Behandlungspraxis von Elektroaltgeräten kommt es häufig zu der Situation, dass durch Zerstörung oder bereits erfolgte Vorbehandlung nur noch Teile von EAG vorliegen, die keinem bestimmten Gerät mehr zugeordnet werden können. Neben den in Punkt VI. genannten Informationen können deshalb auch direkte Kennzeichnungen hilfreich sein für die gezielte Lenkung von Stoffströmen auf Komponenten- und Bauteilebene. Bei manchen Bauteilen mag eine Unterscheidbarkeit durch eine charakteristische Form oder Farbgebung bereits implizit gegeben sein, wie z. B. bei den Ta-Kondensatoren. An einer systematischen und materialspezifischen Kennzeichnung zum Zwecke eines verbesserten Recyclings mangelt es allerdings noch.

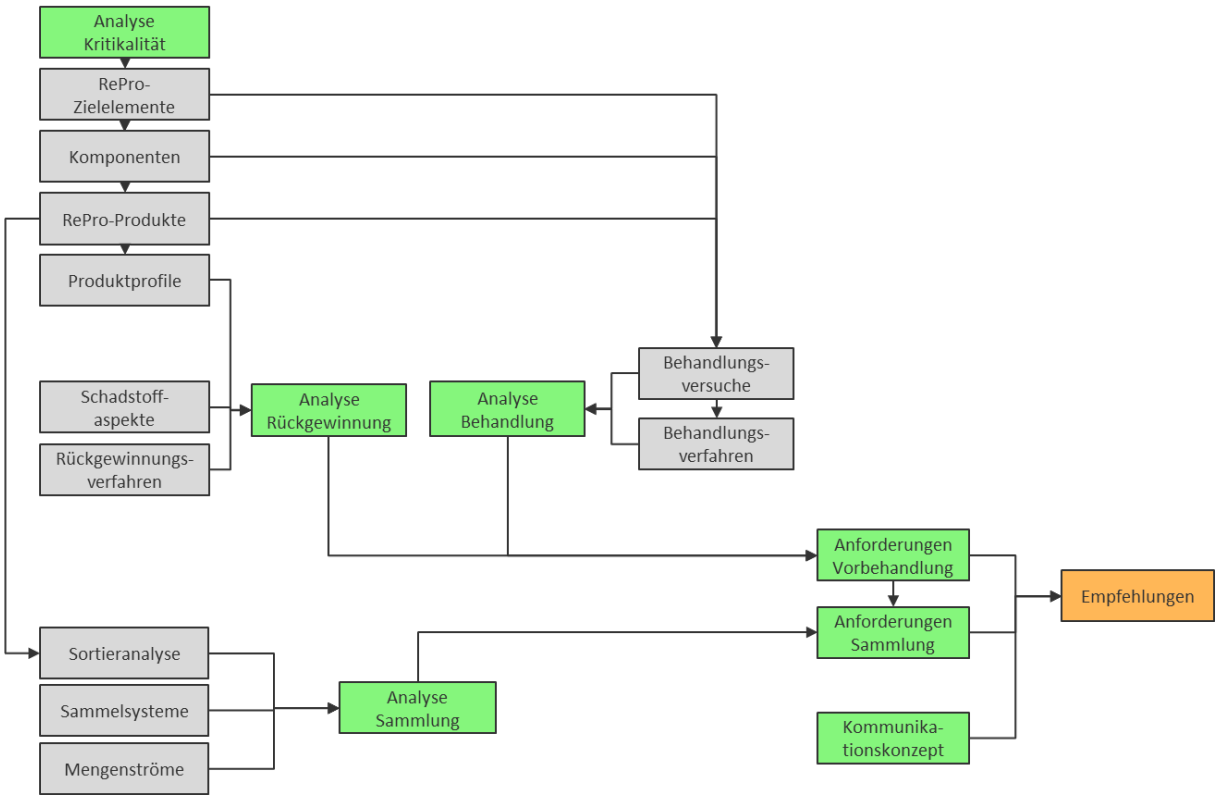
7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchungen zu den relevanten RePro-Geräten haben deutliche Datenlücken bei der Frage der Konzentrationen der RePro-Zielmetalle in den Geräten gezeigt. Auch zur Veränderung der Metallgehalte über die Jahre lagen nur lückenhafte Daten vor. Allerdings zeigte sich auch, dass die verfügbaren Daten in Kombination mit der Interpretation über Experteneinschätzungen in vielen Fällen als ausreichend eingeschätzt werden konnten, um Empfehlungen für die Optimierung der Entsorgung entwickeln zu können. Für die ökonomischen Komponenten bei der Entwicklung von Verfahren zur Vorbehandlung von EAG bzw. Rückgewinnung stellt sich dies jedoch anders dar.

Die folgenden Behandlungsempfehlungen wurden vor dem Hintergrund der Annahmen formuliert, dass eine Behandlungsverordnung auf der Basis des § 24 ElektroG2 erlassen wird und ein Revisionszyklus von 5 Jahren integriert ist. Der zeitliche Aspekt ist vor dem Hintergrund der dynamischen Entwicklung in der Zusammensetzung der Geräte und der Verfügbarkeit von Rückgewinnungs- und Vorbehandlungsverfahren von Bedeutung. Insofern unterscheiden die Empfehlungen zwischen sofortiger und mittelfristiger Umsetzung.

Das Vorgehen zur Ableitung der Behandlungsempfehlungen für die 30 ausgewählten RePro-Geräte erfolgte unter Berücksichtigung der enthaltenen RePro-Metalle und der potenziellen Rückgewinnungs- und Separationsverfahren, siehe Abbildung 164. Eine Darstellung der Vorkommen von RePro-Metallen in den Geräten ist in den Metall-Komponenten-Matrix (siehe Tabelle 14) und der Komponenten-Produkt-Matrix (siehe Tabelle 15) zu finden.

Abbildung 164: Vorgehen zur Ableitung von Behandlungsempfehlungen



Quelle: eigene Darstellung

7.1 Sammlung

Die Untersuchungen zur Erfassung von RePro-Geräten in Deutschland zeigten, dass vergleichsweise große Mengen von RePro-Geräten nicht gemäß ElektroG erfasst werden und Verluste an RePro-Metallen von 670 t (Spannbreite 300 t bis 1.000 t) im Jahr 2012 resultierten, die bis zum Jahr 2020 auf 760 t (Spannbreite 600 t bis 900 t) ansteigen könnten, wenn die Effektivität des Sammelsystems nicht verbessert wird.

Die Analyse des derzeitigen Erfassungssystems zeigte eine relativ geringe Anzahl von Sammelstellen der örE mit vergleichsweise kurzen und/oder wenig verbraucherfreundlichen Öffnungszeiten. Depotcontainer im öffentlichen Raum waren selten verfügbar. Die Sammelstrukturen im Handel hatten zwar eine potenziell höhere Verbraucherfreundlichkeit, ihre Anzahl und die Informationen zur Sammlung an die Verbraucher können aber auch noch stark verbessert werden. Sowohl in der öffentlichen Entsorgung als auch im Handel wird somit Optimierungsbedarf gesehen.

In einer zusätzlichen Analyse wurde die Einbeziehung auch kleinerer Händler bei der 1:1-Rückgabe mit einer Verkaufsfläche für EEG von < 400 m² untersucht. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass das ElektroG2 im Unterschied zur WEEE2-Richtlinie auch bei der 1:1-Rücknahme die Mindestverkaufsfläche von 400 m² vorsieht. Über die Einbeziehung von Händlern mit einer Verkaufsfläche für EEG von < 400 m² würde es zu einer Steigerung der Anzahl der Erfassungsstellen und somit zu einer komfortableren Situation für den Endverbraucher kommen. Hierdurch ist eine verbesserte Erfassungsrate zu erwarten. Alternative Erfassungssysteme nach Artikel 5 Abs. 2(b) der WEEE2-Richtlinie, durch die sichergestellt wird, dass die Rückgabe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte für den Endnutzer im Vergleich nicht erschwert wird, bestehen derzeit nicht.

Die ergänzende Sammlung über Depotcontainer muss eine Lösung für die Anforderungen der ADR zum Transport von Geräten mit Li-Ionen-Batterien finden. Derzeit sind Depotcontainer in der Entwicklung oder auch schon teilweise im Einsatz, die durch die Vermeidung von Umladeprozessen diese Anforderungen voraussichtlich erfüllen. Allerdings ist in diesem Fall mit höheren Kosten im Vergleich zu Entleerungsdepotcontainern zu rechnen. Es besteht zudem die Gefahr, dass in Depotcontainern Geräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen (PC) und besonders schadstoffhaltigen Geräte (Bildschirme mit CCFL) nicht erfasst werden. Vor diesem Hintergrund stellt die Sammlung über die Rücknahme durch den Handel oder mobile Systemeden effektiveren Weg für die Sicherstellung hoher Erfassungsraten dar.

Die Annahme bei der mobilen Sammlung (z. B. Schadstoffmobil) wird als sinnvolle Ergänzung gerade auch bei besonders schadstoffhaltigen Geräten gesehen. Der Bequemlichkeitsgrad ist jedoch deutlich geringer, als bei der Sammlung durch den Handel.

Die Erweiterung der Annahme durch Wertstoffhöfe (höhere Anzahl und Erweiterung der Öffnungszeiten) würde vergleichsweise hohe Kosten verursachen. Andere Systeme könnten da unter Einbeziehung der vorhandenen Logistik und Fläche kostengünstigere Lösungen schaffen.

Die Sammlung über Depotcontainer ist für die Erfassung von Haushaltsgroßgeräten, die einen sehr wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der erreichten Gesamtsammelquoten liefern, nicht geeignet. Die Erfassung von Großgeräten über den Sperrmüll wird zwar als zentraler Baustein der Sammlung von EAG gesehen, doch müssen dabei Diebstähle verhindert werden, was weitere Kosten verursacht. Die Untersuchungen zu den Sammelsystemen im europäischen Ausland zeigten, dass durch individuelle Kombinationen aus spezifischen Systemkomponenten die regionalen Strukturunterschiede (z. B. Bevölkerungsdichte, Angemessenheit des Sammelsystems) am besten berücksichtigt werden können.

7.1.1 Systemkomponenten einer optimierten Erfassung in Deutschland

7.1.1.1 Gemeinsame Erfassung von Geräten mit hohen und niedrigen Gehalten von RePro-Metallen

Die Versuche zur Vorbehandlung von RePro-Geräten haben gezeigt, dass die Rückgewinnungsrate von RePro-Metallen gefördert werden kann, wenn es erreicht wird, dass deren Konzentration schon in den Inputfraktionen der Behandlung hoch ist. Es wird jedoch nicht empfohlen, die Geräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen als gesonderte Gruppe zu sammeln und damit von den gesetzlich festgelegten Sammelgruppen abzuweichen. Die Untersuchungen im Projekt haben auch gezeigt, dass das wesentliche Kriterium für die Erhöhung der Sammelquoten – und damit der Menge der erfassten RePro-Metalle – die bequeme Erreichbarkeit und pragmatische Umsetzbarkeit für die Gerätenutzer ist. Das Sammelsystem sollte daher möglichst einfach gestaltet werden. Hiervon ausgenommen sind ggf. besonders schadstoffhaltige Geräte, die beim Transport Schadstoffe freisetzen können. Ressourcenreiche und -arme EAG sollten gemeinsam erfasst werden. Die erste Konzentrierung bedeutender Elemente sollte während der Vorsortierung der EAG am Eingang Erstbehandler erfolgen.

7.1.1.2 Allgemeine Systemkomponenten der Sammlung

Vor dem dargestellten Hintergrund werden die im Folgenden zusammenfassend dargestellten Komponenten als Elemente eines optimierten Erfassungssystems in Deutschland empfohlen:

- die Sammlung über den Handel sollte mindestens den Vorgaben der WEEE-Richtlinie entsprechen (1:1-Rücknahme für alle Händler, 0:1 Rücknahme für kleine EAG für Händler mit einer Verkaufsfläche für Elektro- und Elektronikgeräte > 400 m^2),
- in Gebieten mit dichter Besiedelung sollte eine ADR-konforme Sammlung über Depotcontainer erfolgen,

eine mobile Sammlung sollte als Ergänzung genutzt werden, wenn die mobile Sammlung bereits für andere Zwecke etabliert wurde (z. B. Schadstoffmobil),die Sammlung kleiner EAG in Unternehmen oder in öffentlichen Gebäuden sollte dort etabliert werden, wo Diebstahl verhindert werden kann, die Sperrmüllsammlung in Form der Straßensammlung sollte auch für Elektrokleingeräte geöffnet werden. Die Voraussetzung wären festgelegte Termine.

7.1.1.3 Ergänzende Komponenten

Zusätzlich sollten über weitere Sammelkomponenten regionale Spezifika oder anlassbezogene Ergänzungen der Erfassung implementiert werden, wie z. B. die Sammlung über spezifische Behälter oder Sammelstellen in Großwohnanalagen; Durchführende könnten Wohnungsbaugesellschaften oder Entsorgungsunternehmen sein.

Aktionsorientierte Sammlungen mit räumlichem Bezug; Diese können ebenfalls für die Erfassung von EAG genutzt werden, wären jedoch aufgrund ihrer zeitlichen Befristung nicht als Solitärsystem für eine Optimierung der Erfassung geeignet. Durchführende könnten die Hersteller oder Händler sowie die örE sein. In Kombination mit den Vorgenannten bietet sich auch die Unterstützung z. B. durch karitative Organisationen und durch Erstbehandler an Aktionsorientierte Sammlungen mit Gerätebezug; etablierte Beispiele sind die Sammlungen von Mobiltelefonen; vergleichbare Aktivitäten könnten für Laptops und Tablets etabliert werden.

7.1.1.4 Kosten und Verantwortlichkeiten

Die im Vergleich zum Status quo höheren Kosten einer optimierten Sammlung müssen entsprechend den Vorgaben der WEEE2-Richtlinie und des ElektroG2 vom Handel und den örE getragen werden. Bei den örE erfolgt in der Regel eine Finanzierung über die allgemeinen Abfallgebühren, sodass Hersteller entgegen dem Prinzip der Herstellerverantwortung nicht belastet werden. Mittelfristig sollte die in Deutschland etablierte geteilte Produktverantwortung daher kritisch hinterfragt werden und Szenarien für die Umstellung auf eine gestärkte Herstellerverantwortung erarbeitet werden.

7.1.1.5 Ökonomische Steuerungsinstrumente

Im Rahmen des Projektes RePro wurden die Möglichkeiten von Pfandsystemen als ökonomische Steuerungsinstrumente untersucht.

Als Ergebnis wird empfohlen, zunächst auf der Grundlage der Vorgaben der WEEE-Richtlinie und des neuen ElektroG, die Weiterentwicklung der Sammlung durch die örE, die Einbindung des Handels sowie durch ein integrierenden Kommunikationskonzeptes die erfassten Mengen zu steigern und diesen Prozess zu verfolgen. Sollten sich diese Ansätze als unzureichend erweisen, sollte die Einführung von ökonomischen Steuerelementen erwogen werden.

7.1.1.6 Sammelziele für Elektroaltgeräte

Die derzeit im ElektroG2 bzw. in der WEEE2-Richtlinie formulierten massenbezogenen Sammelziele[63] berücksichtigen nicht die besondere Relevanz einzelner Gerätearten in Bezug auf die RePro-Metalle. D. h. die Ziele könnten z. B. auch durch intensive Sammlung von Haushaltsgroßgeräten und mit sehr geringen Erfassungsquoten bei IT- und Unterhaltungselektronikgeräten erreicht werden.

[63] „Bis zum 31. Dezember 2015 sollen durchschnittlich mindestens vier Kilogramm Altgeräte aus privaten Haushalten pro Einwohner und Jahr getrennt erfasst werden. … Ab dem 1. Januar 2016 soll jährlich eine Mindesterfassungsquote von 45 Prozent gemessen an dem Gesamtgewicht der erfassten Altgeräte im Verhältnis zum Durchschnittsgewicht der Elektro- und Elektronikgeräte, die in den drei Vorjahren in Verkehr gebracht wurden, erreicht werden. Ab 2019 soll die Mindesterfassungsquote 65 Prozent betragen.“ § 10 Abs. 3 ElektroG2

Es wird empfohlen, die Sammelziele in Bezug auf die Geräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen weiter zu entwickeln. Das kann auch in Ergänzung zu den bestehenden gesamtmassenbezogenen Sammelzielen erfolgen. Hierzu stehen mehrere Optionen zur Verfügung:

In der zukünftigen Gruppierung der EAG entsprechend den Anforderungen des ElektroG2 fallen die untersuchten RePro-EAG in die Gruppe 5 des § 14 ElektroG2[64]. Für diese Gruppe können spezifische Sammelquoten definiert werden. Die Stärke dieser Option ist der geringe Zusatzaufwand für den Nachweis der Sammelmengen bzw. das Monitoring. Die Schwäche besteht darin, dass auch Geräte mit geringen Gehalten an RePro-Metallen in dieser Gruppe enthalten sind (z. B. Haushaltskleingeräte) und das Monitoring dementsprechend eine Annäherung an die Sammlung von Geräten darstellen würde, die hohe Gehalte an RePro-Metallen aufweisen.

Eine weitere Option wäre die Setzung von spezifischen Quoten nur für Altgeräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen. Das Monitoring der erfassten Mengen könnte beim Erstbehandler nach einer Vorseparation erfolgen. Die Stärke dieser Option wäre die vergleichsweise genaue Bestimmung der Menge von Gerätearten mit hohen Gehalten von RePro-Zielmetallen im Inputstrom. Die Schwäche wäre der vergleichsweise höhere Zusatzaufwand für das Monitoring, der dem Erstbehandler entstehen würde sowie bei der Kontrolle der Mengenströme.

Mit Blick auf eine pragmatische Umsetzung wird daher ein Vorgehen wie beispielhaft in die Variante a) dargestellt als sinnvoller angesehen. Die Änderung von Sammelquoten sollte sinnvollerweise nicht auf nationaler Ebene, sondern auf EU-Ebene erfolgen. Hier könnte Deutschland die Initiative ergreifen.

7.1.1.7 Monitoring

Es wird empfohlen, begleitend zur Verpflichtung des Handels zur Sammlung von EAG ein spezifisches und detailliertes Monitoring der angenommenen Mengen aufzunehmen. Es sollten hierzu Gespräche mit dem Handel geführt werden, um eine freiwillige Selbstverpflichtung zu erreichen, nach der zunächst alle angenommenen Geräte in ein spezifisches Monitoring aufgenommen werden, unabhängig davon ob es sich um Gebraucht- oder Altgeräte handelt[65]. Auf diesem Weg könnte der Handel seinen Beitrag zur weiteren Nutzung von Gebrauchtgeräten und zur Kreislaufschließung bei Altgeräten umfassend dokumentieren. Ergänzend kann in eine solche Verpflichtung aufgenommen werden, dass vom Endverbraucher entgegengenommene Geräte nur an zertifizierte ReUse-Betriebe oder in entsprechende Entsorgungspfade gehen.

[64] Gruppe 5: Haushaltskleingeräte, Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik, Leuchten und sonstige Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeuge, Sport- und Freizeitgeräte, Medizinprodukte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente“ § 14 Abs. 1 ElektroG2

[65] Anmerkung: Werden gebrauchte Geräte beim Kunden bei der Anlieferung von Neugeräten durch den Anlieferer mitgenommen, so ist nicht geklärt, ob es sich um ein Altgerät oder ein Gebrauchtgerät handelt.

7.1.2 Integrierendes Kommunikationskonzept

Im Rahmen des Projektes RePro wurden Elemente einer Kommunikationskampagne entwickelt, durch die die Aufmerksamkeit der Endverbraucher für eine optimierte Entsorgung von Elektroaltgeräten erhöht werden kann. Im Ergebnis ist ein Kampagnenansatz entstanden, der den Anforderungen und Zielsetzungen des Projektes RePro gerecht wird und auf fast jede Geräteart adaptiert werden kann.

7.2 Kennzeichnung/ Information

7.2.1 Entsorgungsorientierte Kennzeichnung für den Endverbraucher

Die Untersuchungen zur Optimierung der Sammlung zeigten, dass das Kriterium der Bequemlichkeit für den Endverbraucher einen sehr hohen Stellenwert haben muss, wenn die Sammelquoten erhöht werden sollen. Vor diesem Hintergrund wird nicht empfohlen, eine spezifische Kennzeichnung für Geräte mit hohen Gehalten an RePro-Metallen einzuführen. Die notwendige zusätzliche Aufmerksamkeit beim Endverbraucher sollte vielmehr über Kommunikationskampagnen gefördert werden. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass eine Kennzeichnung von Geräten, die die Kaufentscheidung beeinflusst (besonders umweltfreundlich, besonders langlebig/reparatur-/wiederverwendungs-/recyclingfreundlich z. B. in Form eines Ecolabelings) einer anderen Diskussion bedarf und hier nicht gemeint ist.

7.2.2 Kennzeichnung für den Erstbehandler

Eine Kennzeichnung von Geräten, die Quecksilber enthalten, würde derzeit zu Minderungen des Aufwands in der Vorseparation beim Erstbehandler führen (Aussortierung von Gerätearten, bei denen unklar ist, ob die Geräte noch Hg enthalten oder nicht). Aktuell in Verkehr gebrachte Neugeräte, die Hg in Lampen z. B. in Hintergrundbeleuchtungen und Beamern enthalten, sind derzeit die Ausnahme. Es wird allerdings empfohlen, dass eine Kennzeichnung Hg-haltiger Geräte verpflichtend gemacht wird, solange über die RoHS noch Ausnahmen in diesen Bereichen erlaubt sind.

Eine Kennzeichnung von Gasentladungslampen wird mit Blick auf die Erstbehandler nicht empfohlen, da bei den spezialisierten Betrieben keine Separation von nicht-Hg-haltigen Lampen aus dem spezifischen Sammelsystem auf der Basis einer solchen Kennzeichnung erfolgt.

Eine Kennzeichnung von Lautsprechern und Kopfhörern, die Nd-Magnete enthalten, erscheint sinnvoll, da davon auszugehen ist, dass die großtechnische Rückgewinnung von SE aus Magneten verfügbar sein wird, wenn diese Geräte als Abfallgeräte anfallen. Die Kennzeichnungspflicht sollte mit einer Mindestgröße der Magnete verbunden sein, z. B. Magnete mit einem Gewicht ab 3 g/Stück.

Eine Kennzeichnung von Geräten, die Berylliumoxidkeramiken enthalten, wird als notwendig angesehen. Werden die spröden Keramiken bei einem Aufschluss der Geräte zerkleinert, kommt es zu Emissionen des toxischen BeO. Somit muss eine fachgerechte Separation der BeO-Komponenten vor der Zerkleinerung des Gerätes erfolgen. Zwar ist eine solche Anforderung zur Information der Entsorger durch die in-Verkehr-Bringer auch jetzt schon Bestandteil des ElektroG bzw. ElektroG2. Die bestehende rechtliche Grundlage zu Informationspflichten der Hersteller beim Vorhandensein von Elementen, die die Behandlung beeinflussen, sollte jedoch ergänzend bußgeldbewehrt werden.

Laut § 28 (Informationspflichten der Hersteller) des ElektroG2 muss jeder Hersteller den Anlagen zur Verwertung Informationen über die Behandlung von Elektro- und Elektronikgeräte kostenlos zur Verfügung stellen, soweit dies erforderlich ist, um den Bestimmungen des ElektroG2 nachkommen zu können. Entsprechend den Anforderungen zur Separation bestimmter Komponenten bzw. der Rückgewinnung bestimmter Elemente ergeben sich veränderte Informationspflichten für die Hersteller. Diese umfassen beispielsweise die Nutzung von Nd-Magneten in den Produkten.

7.3 Separation im Rahmen der Erstbehandlung

Entsprechend einer für den Endverbraucher möglichst einfachen Sammlung von EAG, ergibt sich ein heterogener Inputstrom für den Erstbehandler (Geräte mit hohen und niedrigen Gehalten an RePro-Metallen). Daher sollte als erster Schritt der Erstbehandlung eine Vorseparation besonders schadstoffhaltiger Geräte und/oder von Geräten mit hohen Gehalten an RePro-Metallen erfolgen. Das ist technisch durch händischen Zugriff auf dem Förderband liegenden Geräten vor der Zerkleinerung möglich. Die hierfür relevanten RePro-Geräte sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die separierten Geräte können ggf. nach einer Entfrachtung als ressourcenreiche Fraktion gemeinsam behandelt werden, soweit die weiteren Behandlungsanforderungen gleich sind.

Tabelle 118: Empfehlungen zur Vorseparation von RePro-Geräten beim Eingang Erstbehandler (ohne Berücksichtigung der Notwendigkeit der Batterieentnahme)

RePro Nr.	Altgerät	Geräteseparation?	Grund		Anmerkungen zur zukünftigen Perspektive
			Schadstoff	Rohstoff	
3.1	PC	X		X	
3.2	Laptop/Notebook				
3.2.1	mit CCFL	X	X	X	
3.2.2	mit LED	X		X	
3.3	Tablet Computer	X		X	
3.4	Festplatte Extern	X		X	
3.5	USB Stick				
3.6	Projektor (Beamer)	X	X	X	Prüfung des Vorhandenseins von Hg-haltigen Lampen in EoL-Geräten, ggf. sollte dann eine Aufhebung der Vorseparationspflicht erfolgen
3.7	Multifunktionsdrucker	X	X	X	
3.8	Telefon (schnurlos)				
3.9	Navigationsgerät	X	X	X	Prüfung des Vorhandenseins von Hg-haltigen Hintergrundbeleuchtungen in EoL-Geräten; ggf. sollte dann eine Aufhebung der Vorseparationspflicht erfolgen
3.10	Handy	X	X	X	
3.11	Smartphone	X	X	X	
3.12	Digitalkamera (Foto)	X	X	X	
3.13	Camcorder	X	X	X	
3.14	LCD Monitor				
3.14.1	mit CCFL	X	X	X	

Re-Pro Nr.	Altgerät	Geräteseparation?	Grund		Anmerkungen zur zukünftigen Perspektive
			Schadstoff	Rohstoff	
3.14.2	mit LED	X		X	
3.15	LCD Fernseher				
3.15.1	mit CCFL	X	X	X	
3.15.2	mit LED	X		X	
3.16.1	Monitor Röhre	X	Störstoff		
3.16.2	Fernsehgerät Röhre	X	Störstoff		
3.17	Fernbedienung	X	X	X	
3.18	DVD/CD-Player/Videorekorder				
3.19	Videospiel tragbar	X	X	X	
3.20	Videospielkonsole	X		X	
3.21	MP3 Player	X	X	X	
3.22	Lautsprecherbox				Festschreibung einer Separationspflicht vor dem Hintergrund der Verfügbarkeit des Recyclings von SE-Magneten
3.23	Kopfhörer				
4.1	Kompaktleuchtstofflampe	Spezifisches Sammelsystem			
4.2	LED Lampe				
4.3	Leuchtstofflampe				
5.1	Bohrmaschine Batterie	X	X		
5.2	Wecker, Batterie	X	X		
5.3	Kaffeemaschine				
5.4	Rasierapparat	X	X		

Zur Operationalisierung der schadstofforientierten Aspekte einer Vorseparation wird eine Kombination aus Komponenten- und Stoffliste vorgeschlagen:

Die Komponentenliste weist für die Erstbehandler eine hohe Praktikabilität auf, ist aber wenig flexibel und zeigt Schwächen angesichts einer dynamischen Entwicklung in Bezug auf neue bzw. auslaufende Gerätearten und die Komponentenzusammensetzungen.

Eine Stoffliste ist deutlich flexibler und enger auf das dahinter liegende Umweltziel formuliert, verlagert jedoch den Identifikationsaufwand für die betroffenen Komponenten auf den Erstbehandler.

Eine auf die Separation der Batterien oder von Bauteile mit hohen Gehalten an RePro-Metallen ausgerichtete Behandlungsempfehlung im Kontext einer BehandlungsVO für Geräte, in denen Li-Ionen-Batterien verklebt sind kann nicht gegeben werden, da oftmals eine zerstörungsfreie Separation weder manuell noch mechanisch möglich ist.

Eine Vorsortierungsempfehlung zu SE-Magnete enthaltenden Geräten wie Lautsprecher und Kopfhörer ergibt sich im Kontext der Maßnahmen zur Rückgewinnung von SE-Magnetrohstoffen (siehe Kapitel 7.3.3 dieses Berichts). In diesem Fall sollten generell Geräte wie Lautsprecher und Kopfhörer ebenfalls vorsepariert werden, soweit nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie SE-Magnete enthalten.

7.3.1 Zielkomponente Leiterplatten

Für die Separation von Leiterplatten aus den Altgeräten stehen die manuelle Separation und die Separation nach einem schonenden mechanischen Grobaufschluss zur Verfügung.

Große Leiterplatten wie die Hauptplatine in PC können zerstörungsarm und mit vergleichsweise geringem spezifischen Aufwand (Zielelementmenge pro Zeiteinheit) manuell separiert werden. Derzeit stellt die Erlössituation einen ökonomischen Treiber dar, infolgedessen die Erstbehandler die Demontage in vielen Fällen manuell vornehmen. Es sollte angesichts sinkender Konzentrationen von Edelmetallen und PGM[66] und der fortschreitenden Miniaturisierung und Integration eine Überprüfung der Behandlungsanforderung zur manuellen Separation großer Leiterplatten aus IT-Geräten im Revisionszyklus der BehandlungsVO erfolgen.

Die Leiterplatten auf Festplatten sind besonders werthaltig. Die mechanische Separation kann zu deutlicher Zerkleinerung und dadurch zum Transfer von Edelmetall- und PGM-Anteilen in die Feinfraktion führen. Daher wird die manuelle Separierung zum jetzigen Zeitpunkt präferiert. Es sollte jedoch geprüft werden, ob bei spezifischen Verfahren (z. B Hitachi) zukünftig eine zerstörungsarme Separation der Leiterplatte erreicht werden kann.

Bei besonders schadstoffhaltigen Geräten, die manuell entfrachtet werden, kann eine manuelle Separation der Leiterplatten als „Beifangseparation“ mit geringem Zusatzaufwand erfolgen. Dies ist z. B. oft bei Leiterplatten von CCFL-Flachbildschirmen der Fall und sollte als Behandlungsanforderung aufgenommen werden.

Bei komplexen Geräten mit schlechter Zugänglichkeit der Leiterplatten (Laptop, Tablet, Beamer, Multifunktionsdrucker, Navigationsgerät, Mobiltelefone, Digitalkameras (Foto, Video), Videospielkonsolen, DVD/CD-Player) stellt neben der manuellen Demontage

[66] So reduzierte sich der durchschnittliche Gehalt von Gold und Silber in PC-Hauptplatinen zwischen 2003 und 2013 um 40 %, der durchschnittliche Palladiumgehalt um 60 % (Kerckhoven 2014).

auch der grobmechanische Aufschluss und die anschließende manuelle Separation der Leiterplatten aus der Outputfraktion einen sinnvollen Weg unter Abwägung von Aufwand und potenziellen Verlusten dar. Alternativ kann eine optoelektronische Identifikation mit verknüpfter Separation der Leiterplatten sinnvoll sein, sofern eine Effektivität nachgewiesen worden ist, die in der Größenordnung der manuellen Separation liegt. Eine Zertifizierung von Trennverfahren auf der Grundlage der Separationseffizienz kann hier die Entscheidung des Gesetzgebers für eine Zulassung von Behandlungswegen vereinfachen. Der grobmechanische Aufschluss muss gewährleisten, dass die Leiterplatten möglichst weitgehend aus dem Geräteverbund gelöst werden, ohne z. B. durch umfangreiche Scherbewegungen auf der Leitplattenoberfläche relevante Anteile der RePro-Metalle in die anderen Outputfraktionen zu verschieben.

Bei einigen Geräten, die kleine Batterien enthalten (Telefon, Fernbedienung, MP3 Player, Videospiel) können eine Kombination aus Entfrachtung und eine Freisetzung der Leiterplatten im Rahmen eines Grobaufschlusses erfolgen. Sehr kleine, oftmals stabil verbaute Batterien wie z. B. Knopfzellen mit Pufferfunktionen werden hierbei in der Regel jedoch nicht separiert werden können.

USB Sticks sind aufgrund ihrer geringen Größe bei der Separation problematisch. Eine Separation der Geräte aus dem Abfallstrom ist daher ebenso wie eine manuelle Separation der sehr kleinen Leiterplatten vergleichsweise aufwendig bei geringem spezifischem Ertrag (Menge RePro-Metalle je Zeiteinheit). Eine Behandlungsempfehlung kann daher nicht gegeben werden, solange keine effektiven automatischen Separationsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Bei solchen kleinen kompakten Geräten und bei vergleichbaren Geräten mit Batterien (z. B. kleine Navigationsgeräte, kleine Digitalkameras) böte die direkte Zuführung in eine entsprechend arbeitende integrierte NE-Metallhütte (nach einer Entnahme der Batterien) die Möglichkeit der Rückgewinnung einer breiten Palette von RePro-Metallen ohne das Risiko von Materialverlusten bei der mechanischen Aufbereitung (Edelmetalle, PGM, Antimon, ggf. Kobalt).

Als Behandlungsanforderung für Bohrmaschinen (Batterie) und Wecker (Batterie) steht die Entfrachtung im Vordergrund. Eine weitere mechanische Behandlung ist angesichts der geringen Konzentrationen von RePro-Metallen (Masse pro Gerät) sinnvoll.

Für die Geräte Lautsprecher, Kopfhörer und Kaffeemaschinen ist mit Blick auf die RePro-Metalle und beim derzeitigen Stand der fehlenden Verfügbarkeit von Rückgewinnungsanlagen für Neodym keine besondere Behandlungsvorschrift notwendig. Auch hier sollte eine effektive automatische Separationsmöglichkeit für Leiterplatten aus der Aufbereitung gesucht werden. Mit der Perspektive der zukünftigen Nd-Rückgewinnung können sich allerdings für Lautsprecher und Kopfhörer veränderte Behandlungsanforderungen ergeben.

Leiterplatten sollten nach der Freisetzung aus dem Geräteverbund einer Rückgewinnung von Edelmetallen und PGM zugeführt werden. Bei der aktuell fehlenden großtechnischen Verfügbarkeit von Separationsmöglichkeiten für Ta-Kondensatoren und Ga-Komponenten gehen diese RePro-Metalle verloren.

7.3.2 Zielkomponente Batterien

Große Batterien, müssen vor einer mechanischen Behandlung soweit möglich manuell separiert werden.

Durch eine Separation der Batterien durch den Endverbraucher vor der Übergabe in die Entsorgung kann zwar ggf. das Risiko durch Li-Ionen Batterien bei Transport, Lagerung und Behandlung verringert werden. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass eine Separation in jedem Fall erfolgt. Eine entsprechende Bereitstellung zum Transport und ein ADR-konformer Transport muss daher wahrscheinlich in jedem Fall sichergestellt werden. Da die Möglichkeiten zur Wiederverwendung der Geräte wesentlich verringert werden, wenn die Batterie eines Gerätes fehlt, wird eine Entnahme durch den Endverbraucher nur für den Fall als sinnvoll angesehen, dass er eine Wiederverwendung ausschließen will (z. B. aus Datenschutzgründen bei Mobiltelefonen).

Aufgrund der mangelnden recyclinggerechten Konstruktion einiger Geräte (z. B. Verklebung im Gehäuse, Auflöten) ist eine zerstörungsfreie manuelle Separation der Batterien in einigen Fällen nicht möglich. Eine Perspektive für die zukünftige Verbesserung der Situation wird hier bei einem dualen Ansatz aus Anforderungen der Ökodesignrichtlinie für ein verändertes Produktdesign und den Demontagepflichten des ElektroG gesehen. Erstbehandler sollten Geräte, bei denen eine zerstörungsfreie Separation der Li-Ionen-Batterien nicht möglich ist, den für die Ökodesignrichtlinie verantwortlichen Institution wie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und dem UBA berichten.

Abbildung 165: Beispiel für die Verklebung von Batterien in einem Tablet



Quelle: Ökopol GmbH

Batterien sollten nach einer Separation entsprechend den bestehenden rechtlichen Anforderungen (BattG) über die vorgeschriebenen Erfassungspfade wie Batterierücknahmesysteme dem Recycling zugeführt werden.

7.3.3 Leuchtstoffe

Die Separation von Leuchtstoffen aus CRT ist rechtlich vorgeschrieben. Eine stoffliche Verwertung erfolgt jedoch aufgrund fehlender Absatzwege nicht. Zusätzlich sind die sich zukünftig stark verringernden Mengen von CRT im Abfallstrom zu berücksichtigen. Sinnvoll erscheint in der derzeitigen Situation, eine Verfahrensentwicklung zur Rückgewinnung von SE aus Leuchtstoffen von CRT zu fördern, die die zukünftige Mengenentwicklung berücksichtigt (z. B. Vorbehandlung, die die anschließende gemeinsame Behandlung mit Leuchtstoffen aus anderen Gerätearten ermöglicht).

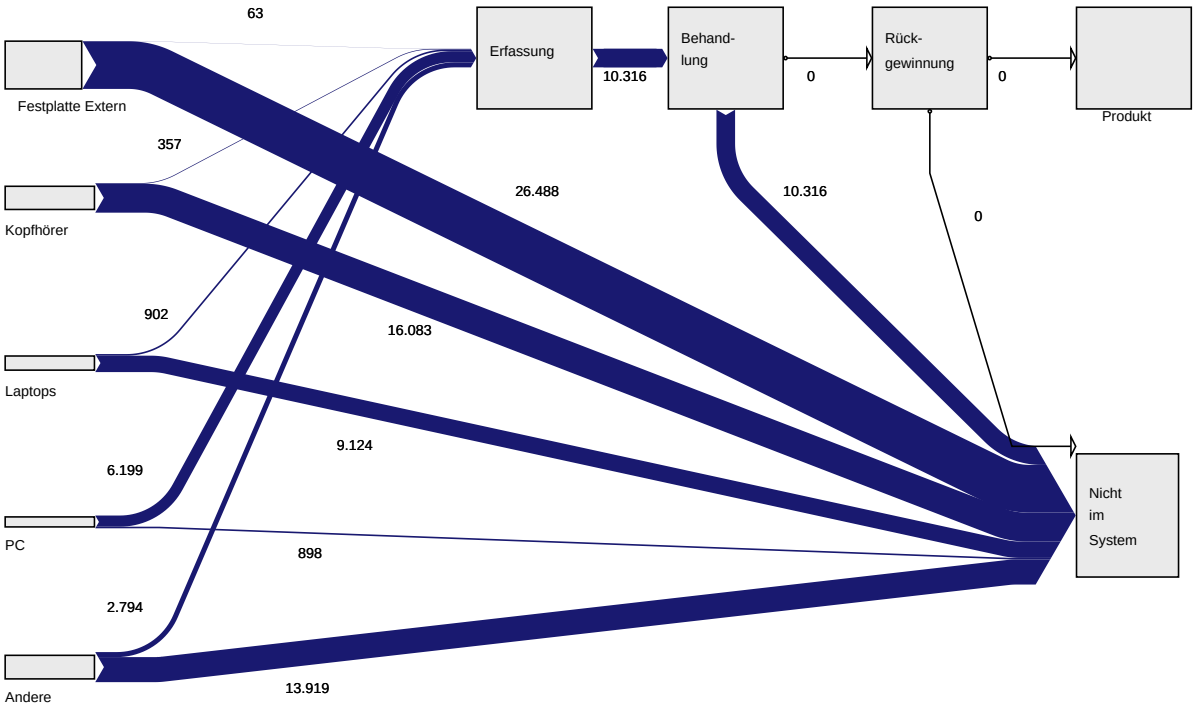
Für Gasentladungslampen wird im ElektroG bzw. ElektroG2 die Entfernung des Quecksilbers vorgeschrieben. Die bestehenden Verwertungsmöglichkeiten für Leuchtstoffe

lassen es sachgerecht erscheinen, eine Pflicht zur Zuführung in die Rückgewinnung der Seltenen Erden in eine BehandlungsVO aufzunehmen.

7.3.4 Optimierung der Rückgewinnung – das Beispiel Neodym

Das Mengenpotenzial von Neodym aus RePro-Geräten im Jahr 2012 lag bei 77 t. Es stammt vor allem aus externen und PC-Festplatten und zu geringeren Anteilen aus Lautsprechern und Mobiltelefonen (siehe folgende Abbildung 166)

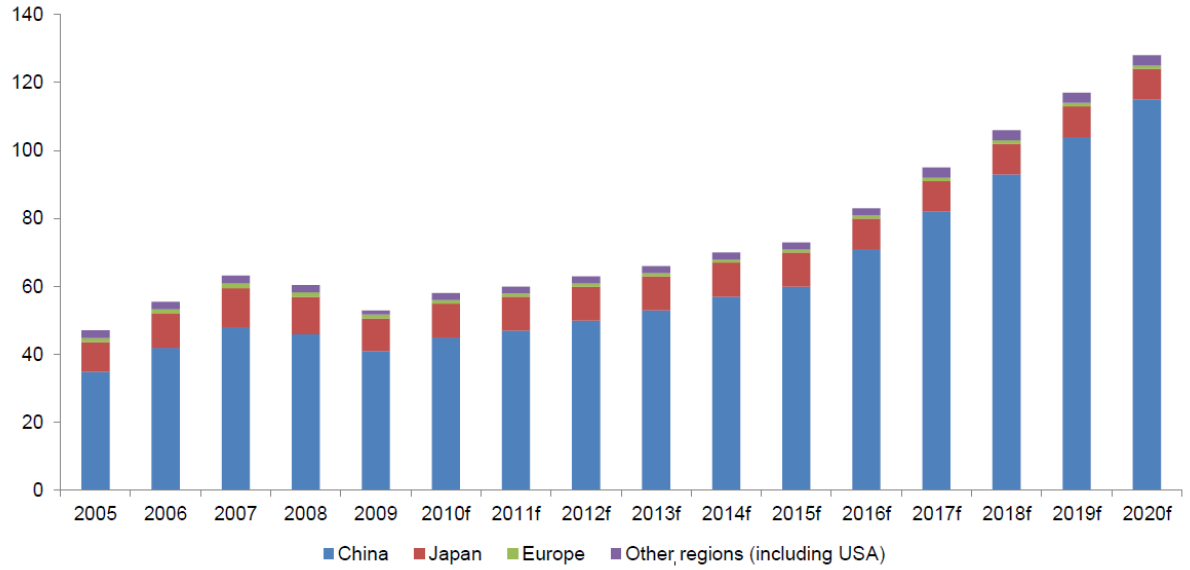
Abbildung 166: Nd-Ströme in Deutschland im Jahr 2012 in kg



Quelle: eigenen Berechnungen, eigene Darstellung

Der Nd-Verbrauch insgesamt steigt deutlich, im IT-Bereich ist die Mengenentwicklung jedoch rückläufig.

Abbildung 167: Globale Nd-Produktion



Quelle: Shaw (2012)

Die Separation der Magnete ist aufwendig aber bereits etabliert (manuell, teilmechanisch), die Rückgewinnungstechniken stehen vor dem upscaling.

Die Ökologische Vorteilhaftigkeit der Sekundärgewinnung gegenüber der Primärgewinnung ist belegt (Bast et al. 2015) und das Recycling würde deutliche quantitative Effekte zur Verringerung des Versorgungsrisikos bringen (Bast et al. 2015).

Bei der Optimierung der Entsorgung bzw. des Recyclings von Nd besteht ein Henne-Ei-Problem:

- Solange keine Separation der Nd-Magnete erfolgt, liegt kein Material für die Rückgewinnung von Nd vor.
- Eine Separation der Nd-Magnete erfolgt jedoch nicht, solange keine Abnahme gesichert ist.

Wir empfehlen zur Auflösung dieses Konfliktes die Implementierung von dualen Ansätzen, bei denen input- und verfahrensorientierte Ansätze parallel verfolgt werden.

Wesentliches Element der inputorientierten Ansätze sollte das „Pooling“ sein. Dabei werden Abfall-Teilströme aus verschiedenen Produktbereichen zusammengeführt und ggf. auch eine länderübergreifende Erfassung verfolgt. Hierdurch werden die Mengenschwellen für ein großtechnisches Recycling früher erreicht. Wenn die Gewinnschwelle für die Verfahren überschritten wurde sind die treibenden Akteure die Recyclingunternehmen (Akquisition der Altkomponenten und Produktionsabfälle). Bis zum Überschreiten der Rentabilitätsschwelle müssen unterstützende Maßnahmen realisiert werden.

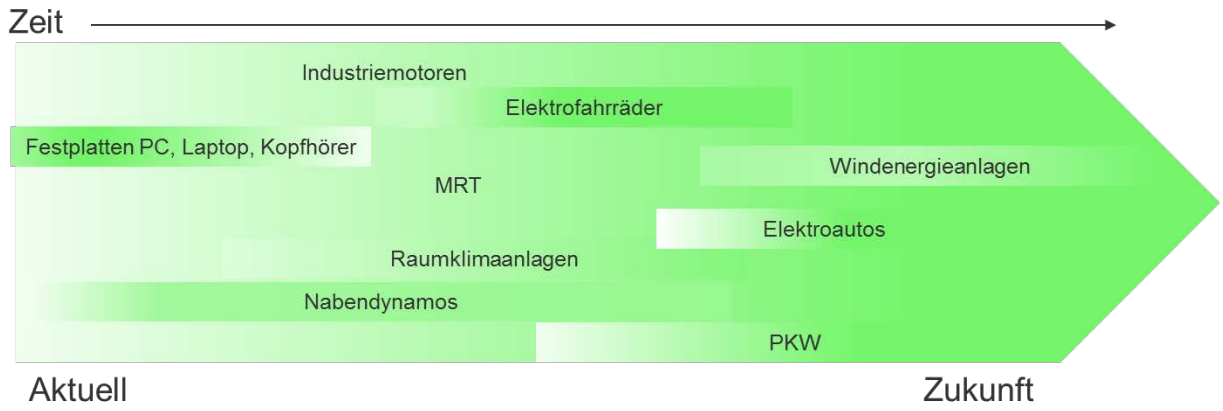
Dabei sollten auch Nd-Ströme aus anderen Herkunftsbereichen einbezogen werden und das Aufkommen von Nd in einer Systemperspektive Betrachtet werden, in der das Mengenaufkommen in einigen Bereichen zurückgeht und in anderen Bereichen steigt und

die jeweiligen Bereiche hinsichtlich ihrer Funktion bei der Entwicklung der Nd-Rückgewinnung gesehen werden sollte. So gehen die Nd-Mengen aus Festplatten aufgrund der technologischen Entwicklung zu SSD-Speichern zurück, haben aber in der Startphase der Nd-Rückgewinnung das Potenzial der Initialmengen. Die Nd-Mengen aus Elektrofahrrädern und mit einer längeren Perspektive auch aus E-Autos steigen zukünftig deutlich an und können Folgemengen darstellen. Industriemotoren können die Funktionen einer kontinuierlichen Mengenbasis einnehmen. Windkraftanlagen können zukünftig zusätzlich zu einer deutlichen Steigerung der Mengen beitragen.

Tabelle 119: Tendenzen der Entwicklung des Abfallpotenzials Nd-haltiger Abfallströme

Produkt	Abfallpotenzial 2020	Tendenz	Quelle
IT	77 t	sinkend	RePro
Motoren (Maschinen)	60 t	steigend	Buchert 2014
Elektrofahrräder	6 t	stark steigend	ReStra
Windenergieanlagen	3 t	stark steigend	ReStra
PKW	2 t	stark steigend	ReStra
Raumklimaanlagen	2 t	stark steigend	ReStra
FCC-Katalysatoren	2 t	gleichbleibend	ReStra
Nabendynamos	1 t	steigend	ReStra
MRTs	< 1 t	gleichbleibend	ReStra

Abbildung 168: Entwicklung des Abfallpotenzials Nd-haltiger Abfallströme



Quelle: eigene Darstellung

Bei den inputorientierten Aktivitäten sollte die Kumulation von SE-Magnetmengen eine wichtige Rolle spielen. Dabei werden SE-Magnete Erfassung und zunächst zwischengelagert. Diese Mengen können zum einen als Inputmaterial für Pilotverfahren dienen. Zum anderen wird hierüber früher das notwendige Material für einen großtechnischen Betrieb von Rückgewinnungsanlagen aus den kumulierten Mengen erreicht. Kumulierte Mengen können zudem einen wichtigen Impuls für Verfahrensinvestitionen bilden. Die Initiierung sollte über die öffentliche Hand erfolgen. Die geringen spezifischen mengen

je Anfallstelle und deren hohe Anzahl legt eine „Milchkannenlogistik“ sowie eine Kombination mit anderen Transportvorgängen nah.

Im vorgeschlagenen dualen Ansatz sollte parallel mit den inputorientierten Aktivitäten die Verfahrensentwicklung durch Förderung der Entwicklung bzw. Optimierung von Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren unterstützt werden und Demonstrationsvorhaben zur Überführung von Pilotanlagen in die Großtechnik gefördert werden.

Zudem sollte eine Anlagenabsicherung durch Absicherung der Investitionen durch die öffentliche Hand erfolgen, und eine erhöhte Investitionssicherheit durch gesicherte Inputverfügbarkeit erreicht werden.

Die Inputverfügbarkeit sollte auch durch eine rechtliche Rahmensetzung erreicht werden, die die getrennte Erfassung von Geräten umfasst (mit den Akteuren Letztbesitzer (Getrenntsammlung) und Entsorger (Vorseparation)) sowie Behandlungs- bzw. Separationsanforderungen und die Pflicht der Zuführung der separierten Nd-Magnete zum Recycling.

Flankierend sollte über Designveränderungen die Separierbarkeit verbessert werden (Design for Dismantling). Dies kann wie z. B. im Falle der Hitachi und Mitsubishi mit Verfahrensentwicklungen verknüpft werden[67]. Als Ansatz bietet sich hier das Instrument der Herstellerverantwortung/Produktverantwortung an.

Hinsichtlich der Informationsverfügbarkeit sind die Anwendungsfelder zu unterscheiden. Die Entscheidung über eine Nd-Kennzeichnung der Produkte sollte anhand von Behandlungspraxis erfolgen:

Beispiel Festplatten: alle mechanischen Festplatten enthalten Nd, alle SSD sind sowieso durch Aufdruck identifizierbar. Daher: keine Kennzeichnung;

Beispiel Windkraftanlagen: es bestehen technische Unterschiede in der Ausführungen und der Rückbau erfolgt durch Fachleute. Bei der Demontage der Gondel könnte eine Kennzeichnung auf Magnetkomponenten unterstützend wirken, aber in der Regel sollte davon ausgegangen werden, dass die Fachleute des Rückbaus von den sehr großen Magneten Kenntnis haben.

Beispiele Autokomponenten: Hierbei sind Unterschiede in der Ausführung zu berücksichtigen. Die Komponenten können sich von Modell zu Modell aber auch von Version zu Version unterscheiden. Eine Kennzeichnung der Komponenten könnte zwar unterstützend wirken, wenn die Komponente sowieso separiert wird (z. B. bei der Reparatur). Im Bereich der Altfahrzeugdemontage muss die Information jedoch verfügbar sein, bevor die Entscheidung über die Demontage erfolgt, d. h. durch eine Herstellerinformation wie z. B. dem IDIS-System, in das Informationen zu Nd-Magnete neu aufgenommen würden.

7.3.5 Tantal

Derzeit sind keine großtechnischen Verfahren für die Separation von Ta-Kondensatoren von Leiterplatten verfügbar. Die manuelle Separation ist möglich, aber sehr aufwendig.

[67] http://www.mitsubishielectric.com/company/environment/ecotopics/rareearth/how/index.html
http://www.hitachi.com/environment/vision/recycle.html

Die fortschreitende Miniaturisierung bei neuen Gerätegenerationen führt dazu, dass sich die gewinnbare Masse pro Zeiteinheit weiter verringert. Bei den besonders relevanten RePro-Gerätearten (Laptops, Tablets, Handys, Smartphones, Digitalkameras) muss von einer durchschnittlichen Verweildauer von 2 bis 11 Jahren ausgegangen werden, sodass im Altgerätebereich noch einige Jahre mehr größere Kondensatoren eintreffen werden, als in den Neugeräten vorhanden sind. Die Untersuchungen zur Separation von Ta-Kondensatoren haben allerdings gezeigt, dass derzeit kein Verfahren vor dem upscaling auf die Großtechnik bekannt ist, das eine Separation ohne relevante Au- und/oder Ag-Verluste erreicht.

Eine Behandlungsempfehlung ist daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

7.3.6 Indium

Indium wird als Koppelprodukt bei Primärzinkgewinnung gewonnen, ist daher in den ersten gewinnungsstufen vor der Konzentration zu hohen Reinheiten nicht mit spezifischen Aufwänden verbunden. Das Indiumpotenzial in RePro-Geräten liegt bei 1 bis 3 t in 2012. Dies entspricht 0,1 bis 0,5 % der Weltjahresproduktion. Das Recycling von Indiumproduktionsabfällen (ITO) ist großtechnisch etabliert, die Separation von Indium aus Altprodukten jedoch noch im Versuchsstadium. Die ökologischen Untersuchungen zeigten nur geringe ökologische Vorteilhaftigkeit des Indiumrecyclings aus Bildschirmen (SWICO 2015).

Unter der Voraussetzung, dass die Indiumnachfrage die Koppelproduktmenge nicht übersteigt[68], wird nur eine geringe ökologische Vorteilhaftigkeit des Indiumrecyclings aus Bildschirmen festgestellt, wenn eine manuelle Demontage erfolgt. Bei einer mechanischen Separation der Indiumschicht wurde kein ökologischer Vorteil festgestellt[69] (SWICO 2015).

Vor diesem Hintergrund, aber auch mit Blick auf das zukünftige Potenzial für eine Kreislaufschließung bei diesem wichtigen strategischen Metall, sollte eine Prüfung im Revisionszyklus der Behandlungsverordnung erfolgen, ob eine entsprechende Behandlungsanforderung aufgenommen werden sollte. Im Rahmen der Prüfung sollten die Ergebnisse der aktuell laufenden Forschungsvorhaben und Verfahrensentwicklungen zur Indiumrückgewinnung aus Elektroaltgeräten ausgewertet werden.

---

[68] Angesichts der aktuellen Situation und der vorhersehbaren Mengenentwicklung wird es als unwahrscheinlich angesehen, dass der zukünftige Indiumverbrauch so stark ansteigt, dass die Koppelproduktion über die Zinkroute nicht mehr ausreichend Material liefern wird.

[69] „Dabei zeigte es sich, dass die Rückgewinnung von Indium mit vorangehender manueller Zerlegung etwas besser abschneidet als die heutige Primärproduktion (Indium wird als Nebenprodukt von Zink gewonnen), während die Rückgewinnung von Indium nach mechanischer Aufbereitung mit grösseren Umweltauswirkungen verbunden ist als die Primärproduktion. Sollte Indium in Zukunft nicht mehr wie heute als Nebenprodukt, sondern als Hauptprodukt gewonnen werden, etwa aufgrund einer starken Zunahme der Nachfrage durch die Wirtschaft, würde die Primärproduktion hingegen mit grossem Abstand schlechter abschneiden als beide Rückgewinnungsverfahren (manuelle Zerlegung bzw. maschinelle Aufbereitung der Flachbildschirme vor der nasschemischen Weiterverarbeitung)“ (SWICO 2015).

Grundsätzlich muss bei der notwendigen Abwägung berücksichtigt werden, dass durch ein Recycling von Indium nicht weniger Zink-Primärerz abgebaut werden wird und somit die Umweltentlastung nur aus dem raffinationsschritt zum reinen Indium resultiert. Eine solche konsequenzielle Betrachtung führt zu anderen Ergebnissen, als eine attributive Betrachtung.

Daher wird empfohlen, je nach Ergebnis der aktuell laufenden Verfahrensentwicklungen zur In-Separation die Indium-Rückgewinnung ggf. zukünftige in einer Behandlungsverordnung zu berücksichtigen.

7.3.7 Antimon

Derzeit existieren keine Verfahren zur Kreislaufführung von Sb_2O_3 aus EAG-Kunststoffen. Eine Rückgewinnung aus Leiterplatten als Antiomon ist über die Kupferpyrometallurgie etabliert.

Solvolyseverfahren zur Rückgewinnung von Antimon aus Kunststoffen (z. B. Gehäusen) sind im Pilomaßstab etabliert.

Angesichts der Kritikalität von Antimon und dessen Toxizität (siehe Kapitel 2.9.2) sollte geprüft werden ob duale Förderansätze wie für Nd beschrieben (siehe Kapitel 7.3.4) realisierbar sind.

7.3.8 Recyclingziele

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Darstellung der Gehalte von RePro-Metallen mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Aufgrund der sehr großen Vielzahl von Geräten und ihren Variationen sowie der dynamischen Entwicklung neuer Geräte und ihren Elementgehalten ist auch für die Zukunft eine vergleichbare Situation zu erwarten.

Über eine Deklarationspflicht im Rahmen der Anforderungen der Ökodesignrichtlinie könnten für Neugeräte Entwicklungen bei den Gehalten strategischer Rohstoffe identifiziert und Schlussfolgerungen für die Abfallwirtschaft abgeleitet werden.

Eine quantifizierende Definition von Recyclingzielen für RePro-Metalle (z. B. quantifizierende Recyclingquoten) wäre angesichts der bestehenden dynamischen Situation und der sehr großen Gerätevielfalt nur möglich, wenn man Ziele wählt, die die Datenunsicherheiten über entsprechende Spielräume abfangen, d. h. Recyclingquoten wählt, die niedrig angesetzt sind. Um ambitionierte Ziele formulieren zu können, erscheint die Zuführung zur Rückgewinnung in Kombination mit einer Vorbehandlungspflicht wie oben beschrieben ein geeigneter Maßstab zu sein. Dabei sollte die Anforderung der Zuführung mit bestimmten Anlagenstandards kombiniert sein. Diese Standards können z. B. für Edelmetalle und PGM eine Mindesteffizienz bei der Rückgewinnung enthalten und durch die Anlagen z. B. durch Zertifizierungen nachgewiesen werden.

In der Diskussion um die Monitoringschnittstelle der Quotenfestlegung (Input oder Output einer Rückgewinnungsanlage) spricht vieles für eine inputorientierte Festlegung. Eine Betrachtung, die den Output der Rückgewinnungsanlage als Maßstab nimmt, wäre angesichts der Komplexität integrierter Hütten und der vielfältigen Inputstoffe – wenn überhaupt – nur mit sehr großem Aufwand überprüfbar.

7.3.9 Design for Dismantling

Die Untersuchungen im Rahmen des RePro-Projektes zeigten, dass durch veränderte Gestaltungen der RePro-Geräte die Separation von Komponenten mit hohen Gehalten an RePro-Metallen erleichtert würde bzw. effizienter gestaltet werden könnte. Zum Beispiel könnte durch eine veränderte Konstruktion von PC eine deutliche Verringerung der Entnahmezeiten von Leiterplatten erreicht werden.

Abbildung 169: Beispiel eines Designs for Disassembly für die Hauptplatine eines PC, dabei kann die Hauptplatine nach Lösen einer Befestigung aus dem PC ohne weitere Geräteöffnung herausgezogen werden



Quelle: Ökopol GmbH

Viele Designansätze sind vom Ansatz her entwickelt, einige waren auch schon in der Praxis etabliert, sind jedoch wieder vom Markt verschwunden (Beispiel: Design für eine Schnelldemontage von Festplatten), da auf der Abfallseite keine korrespondierende Anforderung vorhanden war, durch die einen Nutzen aus solchen Konstruktionen erzielt werden konnte. In der Kombination von Designanforderungen in der Ökodesignrichtlinie und Behandlungsanforderungen im Rahmen der BehandlungsVO zum ElektroG2 könnte ein dualer Ansatz mit einem Ineinandergreifen der verschiedenen Rechtsbereiche erreicht werden.

Abbildung 170: Öffnen des PC werkzeugfrei durch Druck auf einen Knopf und werkzeugfreie Entnahme der Festplatte durch Drücken der Befestigungsclips, Demontagezeit: 3-5 Sekunden







Quelle: Ökopol GmbH

Die Wirkung eines optimierten Produktdesigns beträfe in Deutschland unterschiedliche Akteursgruppen. Hinsichtlich der Konstruktion läge der Aufwand bei den Herstellern. Die Verringerung des Aufwandes der Separation käme den Erstbehandlern zugute, die dies ggf. über höhere Preise an die Sammelstellen weitergeben könnten (derzeit die örE, zukünftig ggf. auch die Händler). Verbesserungen beim Design For Dismantling kämen in der momentanen Praxis der geteilten Produktverantwortung in Deutschland den Herstellern allerdings nicht zugute. Auch vor diesem Hintergrund sollte die in Deutschland etablierte geteilte Produktverantwortung daher kritisch hinterfragt werden und Ausstiegsszenarien für ein phase out der geteilten Produktverantwortung entwickelt werden.

8 Mengenstrombilanzen der RePro-Metalle

Abschließend wurden drei unterschiedliche Szenarien der Sammlung, Erfassung und Behandlung von Elektroaltgeräten betrachtet und auf der Basis der in diesem Vorhaben durchgeführten Quantifizierungen elementspezifische Mengenstrombilanzen errechnet. Die Berechnung basierte auf dem in Tabelle 39 dargestellten Abfallpotenzial für das Jahr 2020. Das erste Szenario ist die Fortführung der derzeitigen Verfahrensweise und wird als business as usual (BAU) bezeichnet. Hier wurde die derzeitige Sammelquote und Behandlungspraxis auf die für 2020 errechneten Massenströme angewandt. Das zweite Szenario, OPT genannt, bezieht sich auf eine optimierte Erfassung der relevanten EAG mit anschließender Status-quo-Behandlung. Hier wurde angenommen, dass Leiterplatten separiert und einer separaten Behandlung zugeführt werden[70]. Bei dem dritten Szenario (OPT OPT) berücksichtigt die optimierte Erfassung aus dem Szenario OPT und zusätzlich optimistische aber realisierbare Annahmen für die Vorbehandlung und Rückgewinnung (siehe Kapitel 7)[71]. Die Ergebnisse wurden in den folgenden Abbildungen (Abbildung 171–Abbildung 179) in Fließdiagrammen zusammengetragen.

Durch die Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen kann für das Jahr 2020 eine Reduzierung der Verluste von RePro-Metallen um 250 t auf 500 t (Spannbreite 350 t bis 600 t) geschätzt werden.

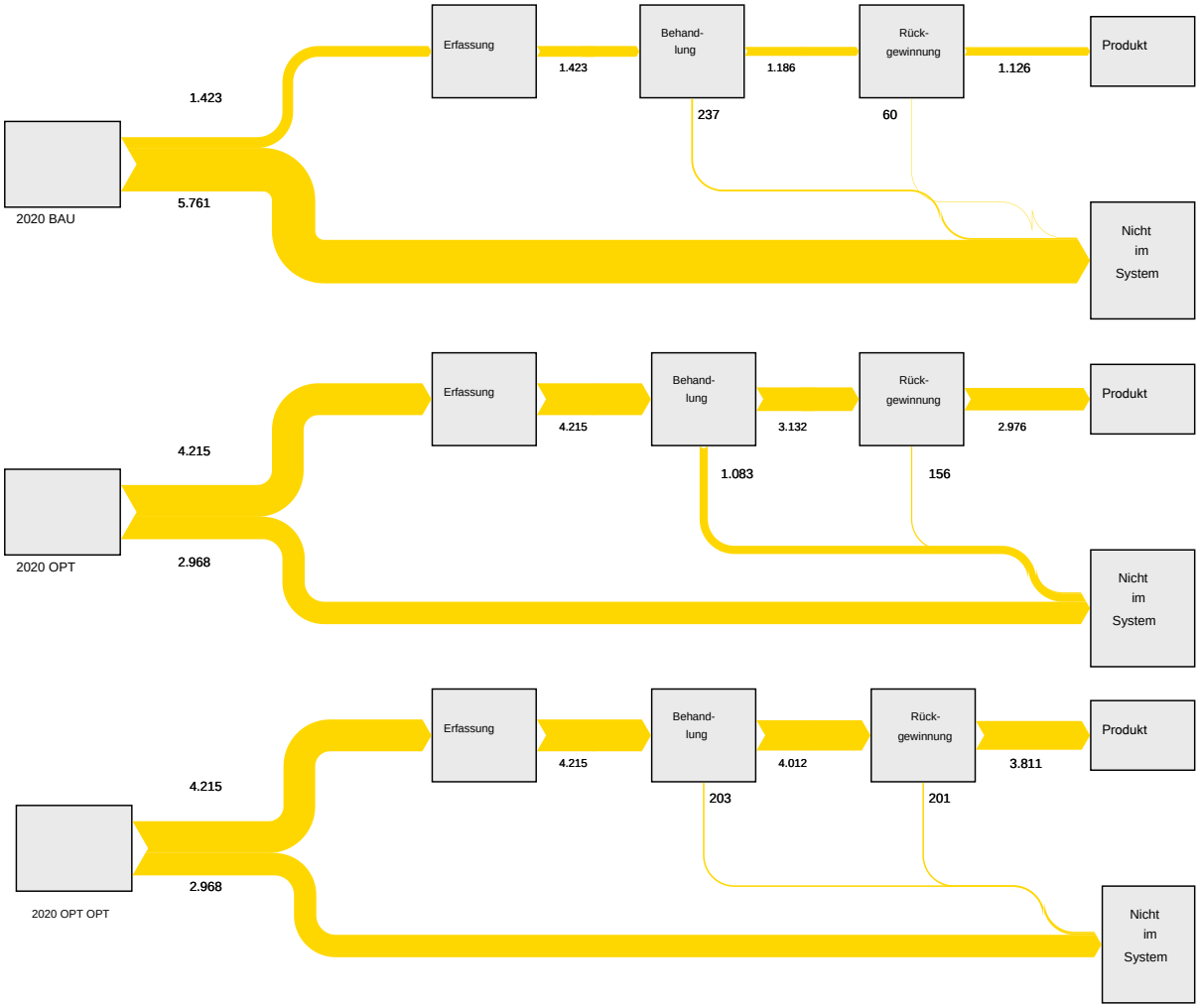
8.1 Zielelement Au

In Mengenstrombetrachtungen für das Element Gold wurden für das Jahr 2020 unterschiedliche Szenarien der Sammlung, Erfassung und Verwertung gegenübergestellt (Abbildung 171) und damit der volkswirtschaftliche Nutzen einer optimierten Behandlung visualisiert. Bei Fortführung der derzeitigen Praxis ist vorhersehbar, dass 80 % des in Geräten verarbeiteten Goldes nicht in den etablierten Systemen nach ElektroG erfasst bzw. zurückgewonnen werden. Bei der zweifach optimierten Entsorgung konnten bis zu 60 % erfasst bzw. wiedergewonnen werden. Folglich könnte die Effizienz bei der Bereitstellung von sekundärem Gold verdreifacht werden. Die Diagramme verdeutlichen zudem, dass die Erfassung der Schritt mit dem größten Steigerungspotenzial ist, während es bei der Behandlung und Rückgewinnung zu vergleichsweise geringen Goldverlusten kommt. Auf Geräteebene wurde festgestellt, dass vor allen Dingen Mobiltelefone, Laptops, Tablets und kleine Geräte schlecht erfasst werden und damit zu erheblichen Verlusten führen.

[70] Annahmen: Separation LP manuell oder verlustarm mechanisch, kein DfR für Entnahme Haupt-LP bei PC, Laptop & Tablet, Multifunktionsdrucker, Telefone, Navi, Digicam, Camcorder, Fernbedienung, Videospiel tragbar, Videospielkonsole, Bohrmaschine, Wecker; keine automatische Identifikation von USB Sticks und MP3 Player, Separation von Ta von LP ist nicht möglich

[71] Annahme Separation LP manuell oder verlustarm mechanisch, DfR für Entnahme Haupt-LP bei PC, Laptop & Tablet, Multifunktionsdrucker, Telefone (Beifang mit Batterie), Navi, Digicam, Camcorder, Fernbedienung (Beifang Batterie), Videospiel tragbar, Videospielkonsole, Bohrmaschine (Beifang Batterie), Wecker (Beifang Batterie); automatische Identifikation von USB Sticks und MP3 Player, Separation von Ta von LP ist möglich (30% Verlust); In wird separiert, Y wird separiert; DfR für Festplattenentnahme bei Laptop und Tablet und mech. Separation der Magnete; DfR für Magnete und Kennzeichnung bei Kopfhörern und Lautsprechern

Abbildung 171: Au-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

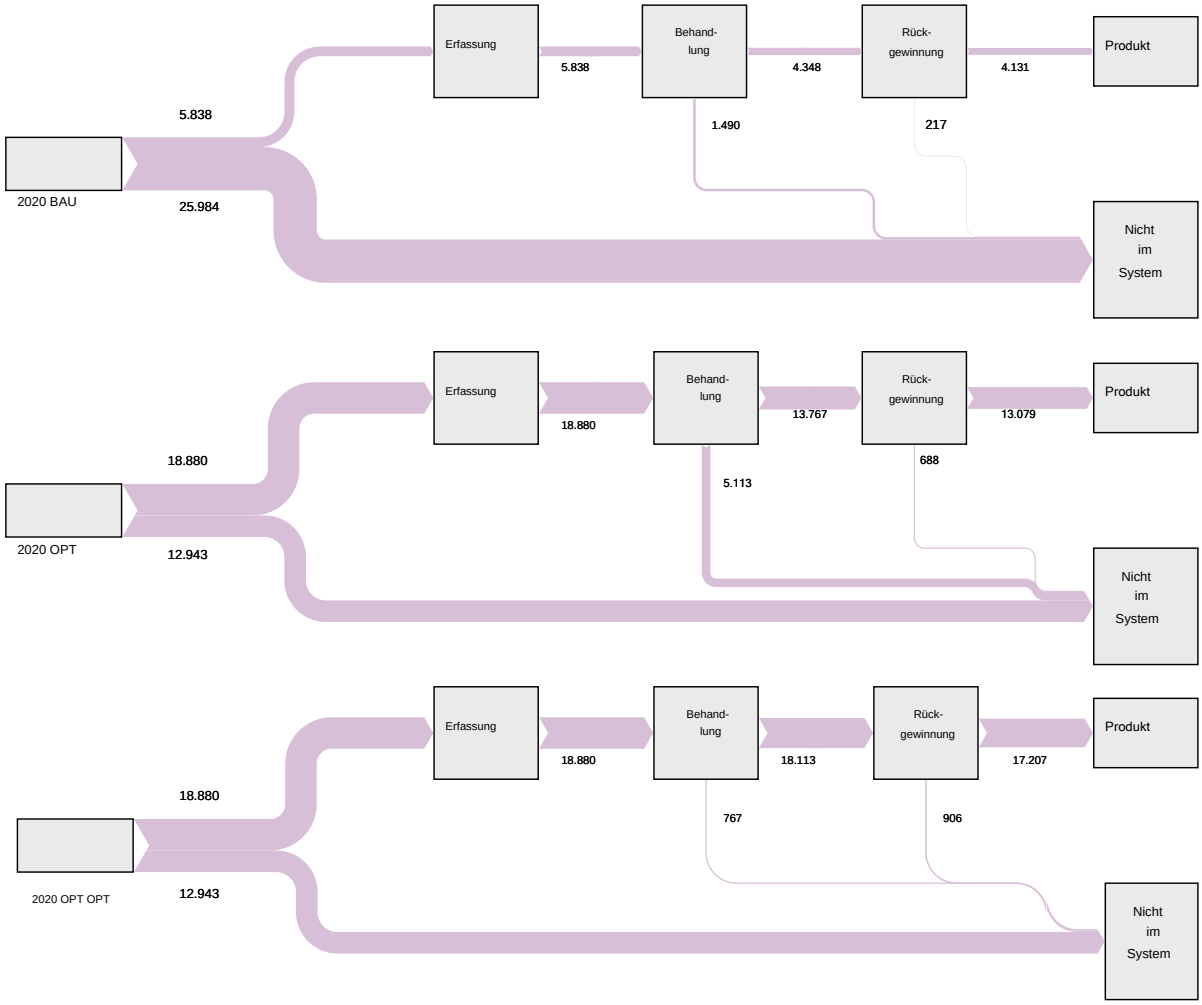


Quelle: eigene Darstellung

8.2 Zielelement Ag

Ebenso wie für das Element Gold wurde eine Mengenstrombilanz für das Element Silber erarbeitet (Abbildung 172). Hier konnte im Vergleich zum Status quo eine Steigerung der Silberrückgewinnung um das Vierfache vorhergesagt werden. Der kritische Schritt ist ebenfalls die Geräterfassung. Auf Geräteebene werden bei Smartphones, Laptops und Videospielkonsolen die größten Verluste gesehen. Die verbesserte Geräteerfassung bezüglich Gold und Silber betrifft also weitestgehend die gleichen Produkte.

Abbildung 172: Ag-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

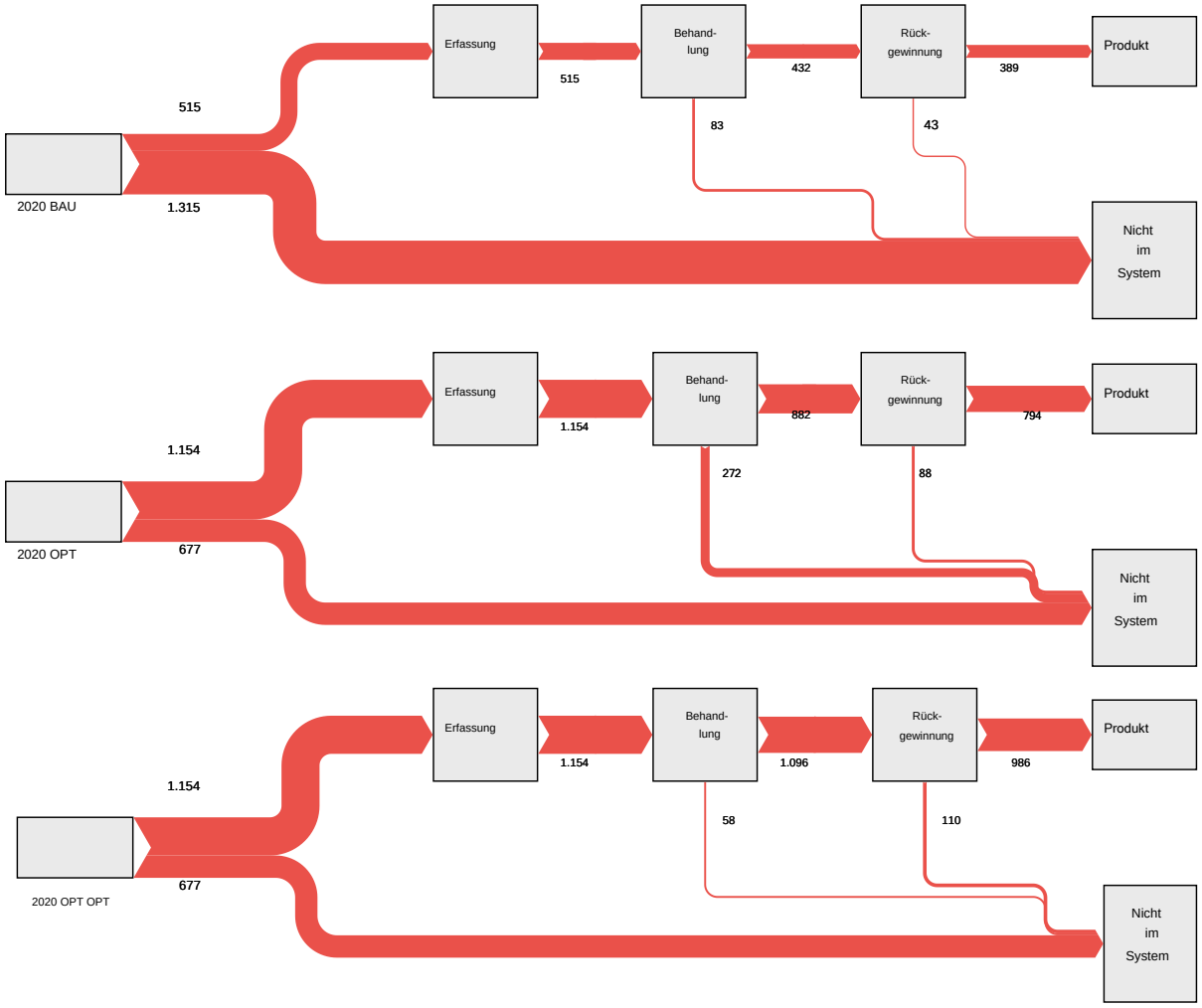


Quelle: eigene Darstellung

8.3 Zielelement Palladium

Das dritte Element, welches über die Kupferroute zurückgewinnbar ist, ist Palladium. Die Mengenstrombilanzen in Abbildung 173verdeutlichen das Steigerungspotenzial bezüglich der Rückgewinnung bei optimierter Erfassung und Behandlung um das Dreifache. Auch bezüglich Palladium ist die Erfassung der wesentliche Verlustschritt ist. Während Palladium aus PC bereits heute vergleichsweise zu hohen Anteilen zurückgewonnen wird, besteht großes Steigerungspotenzial bei Laptops, LCD-Fernsehern und Videospielkonsolen.

Abbildung 173: Pd-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

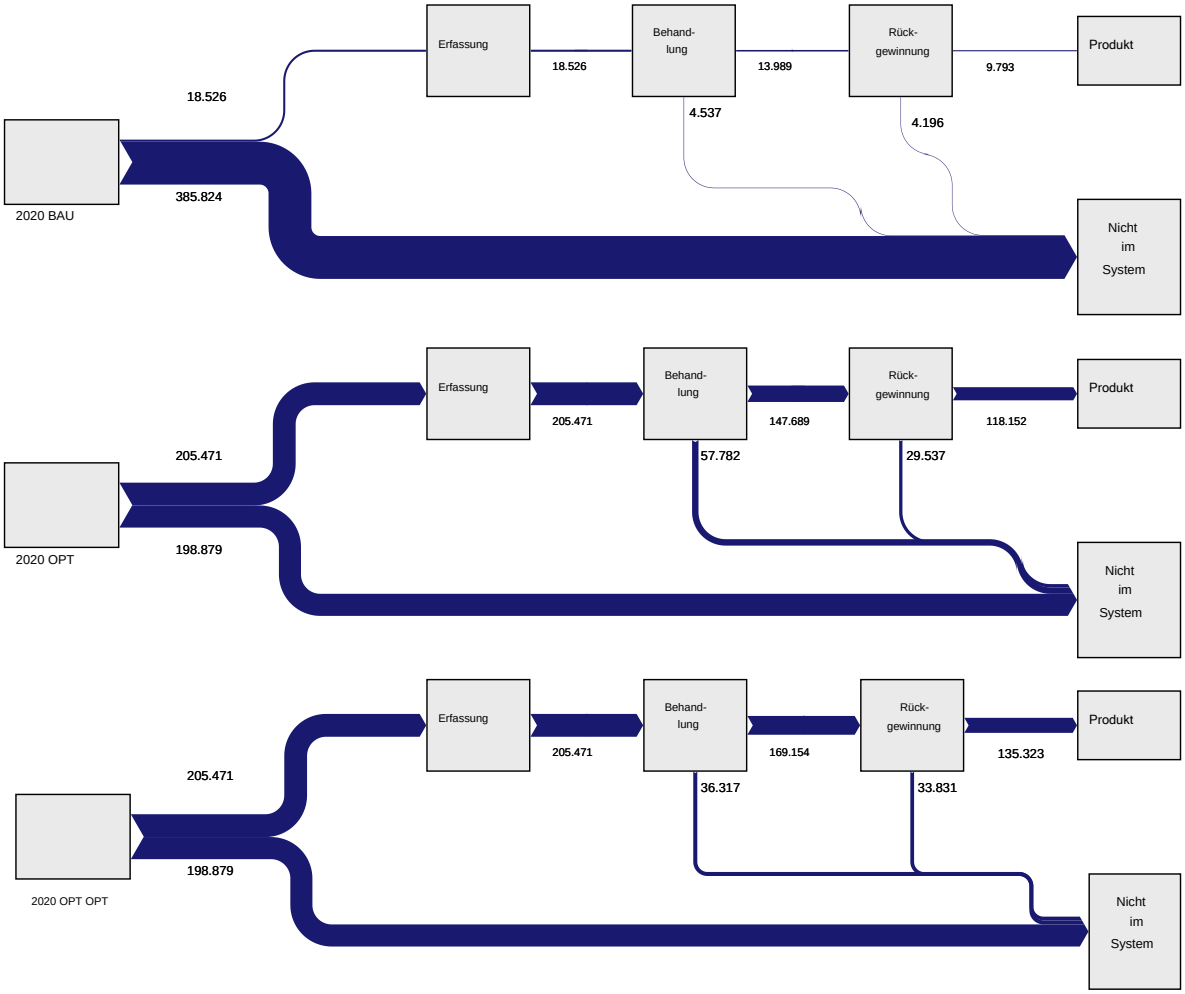


Quelle: eigene Darstellung

8.4 Zielelement Co

Das Element Kobalt, welches sich vorwiegend in Batterien befindet, kann theoretisch zurückgewonnen werden, doch verdeutlichen die Mengenstrombilanzen in Abbildung 174, dass derzeit deutlich weniger als 5 % des Kobalts zurückgewonnen werden. Mit den optimierten Szenarien wären bis zu 50 % erreichbar. Auch bei der Kobaltrückgewinnung stellt die Erfassung den kritischen und stark zu verbessernden Schritt dar, zugleich kommt es aber auch bei der Behandlung und Rückgewinnung zu Verlusten. Laptops, Smartphones, Handys, Digitalkameras u. a. werden derzeit nicht für die Kobaltrückgewinnung optimiert erfasst bzw. behandelt. Dies ist auch mit den hohen Verlustraten dieser Geräte und der fersten Verbauung der Batterien in den Geräten zu begründen. Mit den Verlusten des Kobalts geht auch eine unzureichende Schadstoffentfrachtung der Abfälle einher, die Umwelt- und Gesundheitsrisiken nach sich zieht.

Abbildung 174: Co-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

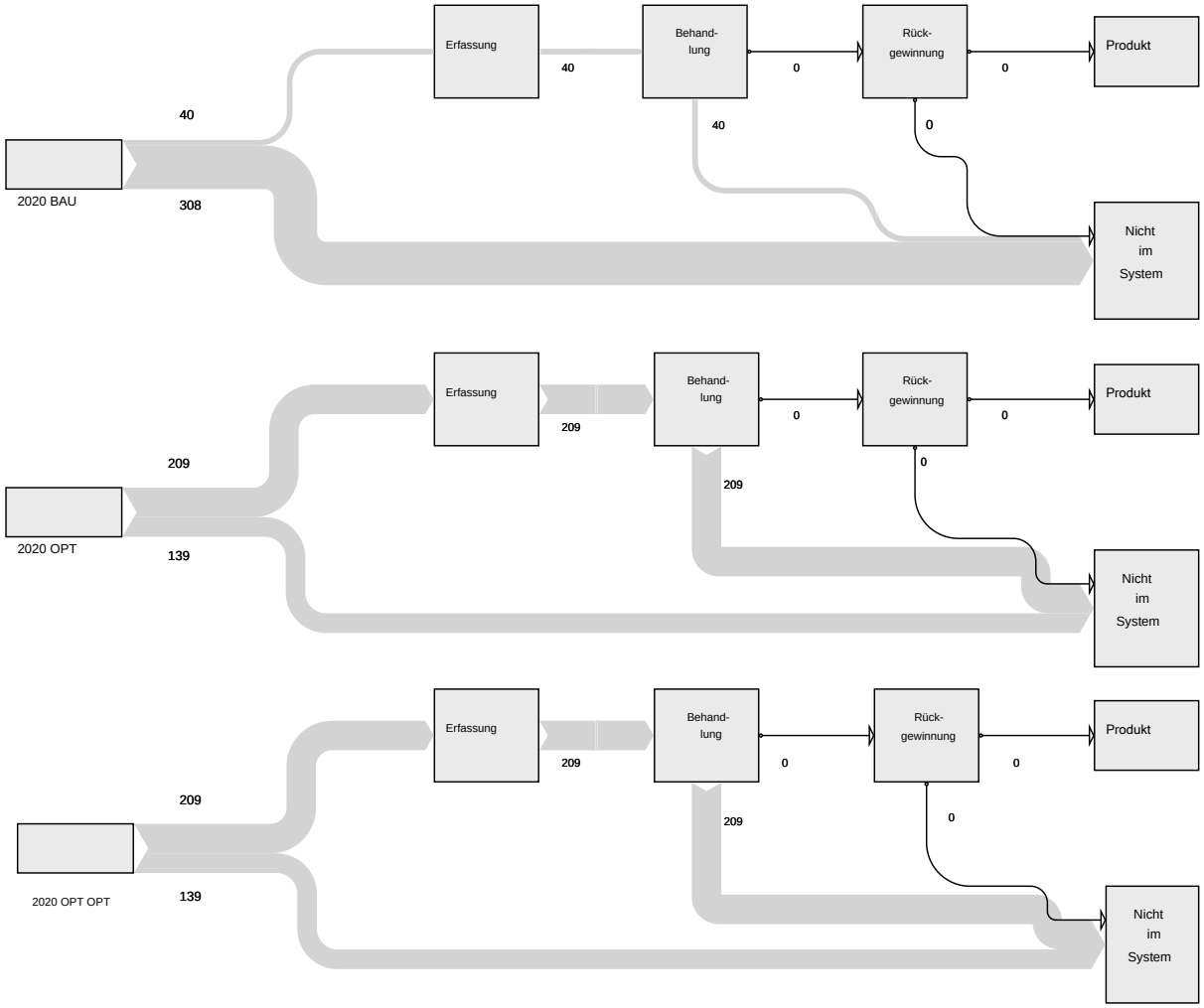


Quelle: eigene Darstellung

8.5 Zielelement Ga

Die Mengenstrombilanzen für Gallium verdeutlichen, dass derzeit effektiv kein Gallium zurückgewonnen wird (Abbildung 175). Zunächst wird weniger als 10 % erfasst und auch diese Menge kann letztlich nicht als Sekundärmaterial in Produkte überführt werden. Durch eine optimierte Erfassung könnte bis zu 60 % erfasst werden, aber auch dann wäre nach derzeitigem Stand der Technik mit einem vollständigen Verlust während der Behandlung zu rechnen. Eine auf die Rückgewinnung von Gallium abzielende Abfallbehandlung ist daher derzeit noch nicht sinnvoll, zumal auch die absoluten Mengen und der monetäre Wert vergleichsweise gering sind. Gallium wird aber als bedeutend für Zukunftstechnologien erachtet und kann deshalb mittelfristig eine hohe Kritikalität haben. Somit sollte vorausschauend die Entwicklung optimierter Behandlungs- und Rückgewinnungsverfahren angestrebt werden. Anschließend könnten dann die Abfallströme auf die vorhandenen Verfahren abgestimmt und umgeleitet werden, sofern keine Zielkonflikte mit anderen kritischen Rohstoffen bestehen.

Abbildung 175: Ga-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/



8.6 Zielement Yttrium

Die Mengenstrombilanzen des Elements Yttrium belegen, dass Yttrium bereits heute vergleichsweise gut erfasst wird. Etwa 50 % werden der Behandlung zugeführt. Derzeit ist die Yttriumrückgewinnung nicht großtechnisch etabliert. Somit wären ebenso wie für Gallium Verfahren der Yttriumrückgewinnung zu entwickeln.[72]

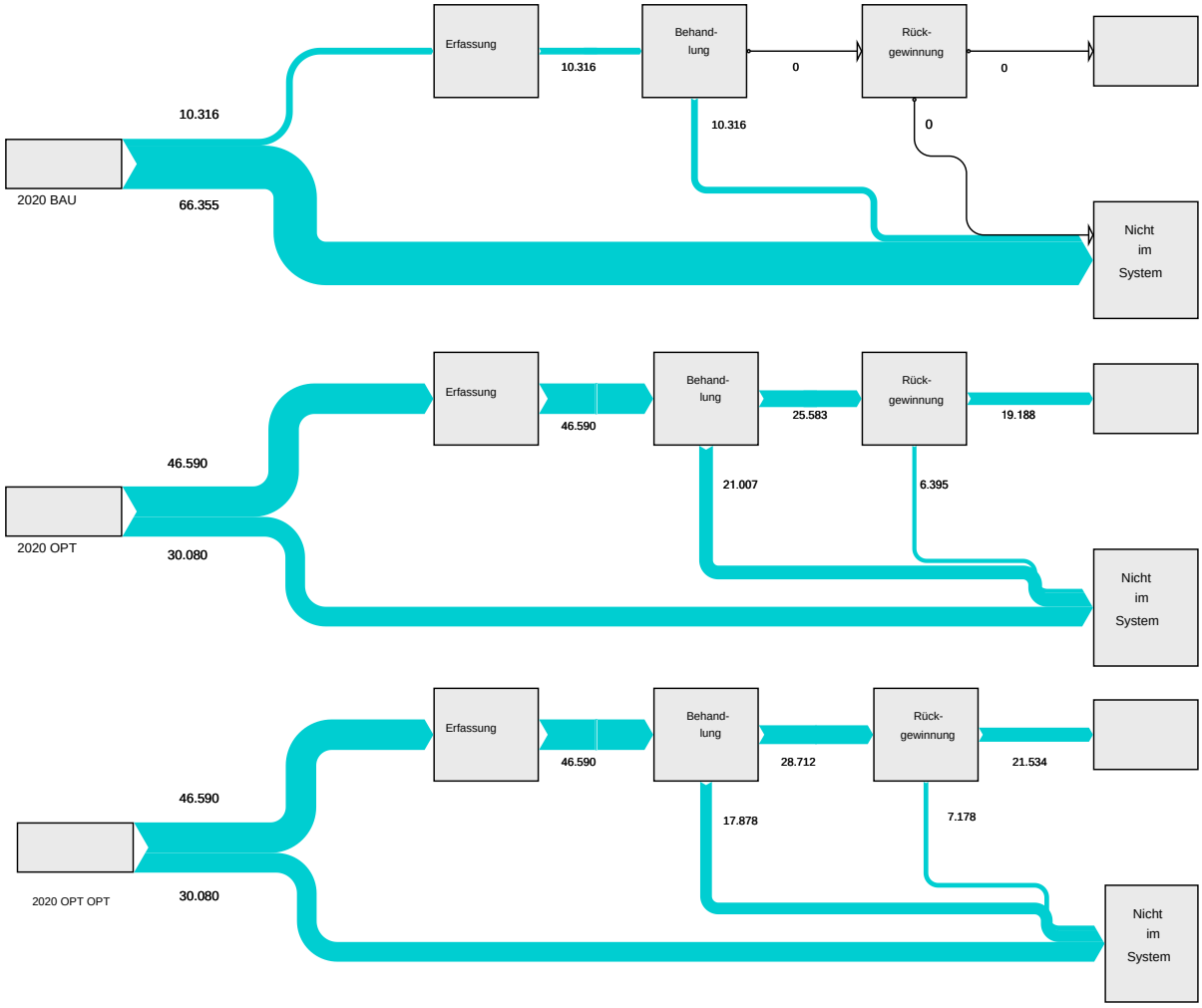
8.7 Zielelement Nd

Die mengenrelevanteste Anwendung von SE-haltigen Magneten in RePro-Geräten erfolgt in Festplatten (v. a. externe Festplatten, PC). Der Gesamtmassenstrom liegt in der Größenordnung zwischen 56 t und 97 t im Jahr 2020. Die Mengenstrombilanzen in Abbildung 176 verdeutlichen, dass derzeit Neodym nur zu etwa 15 % erfasst wird und das er-

[72] Die Bilanzierung der Mengenströme für Yttrium kann hier leider nicht in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt werden, da die der Berechnung zugrunde gelegten Annahmen im Projektverlauf geändert wurden und eine Neuberechnung nicht möglich war.

fasste Neodym während der Behandlung verloren geht. Bezüglich Neodym bestehen sowohl in der Erfassung als auch in der Behandlung und Rückgewinnung Verbesserungspotenziale. Ähnlich wie bei Gallium hat Neodym eine große Bedeutung für Zukunftstechnologien, sodass der Abfallstrom und die Rückgewinnung in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnten. Dabei ist Neodym einerseits mengenrelavanter und andererseits umweltrelevanter als Gallium, so dass Handlungsbedarf bezüglich einer besseren Erfassung und der Entwicklung und Optimierung der Behandlungsverfahren gesehen wird.

Abbildung 176: Nd-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a



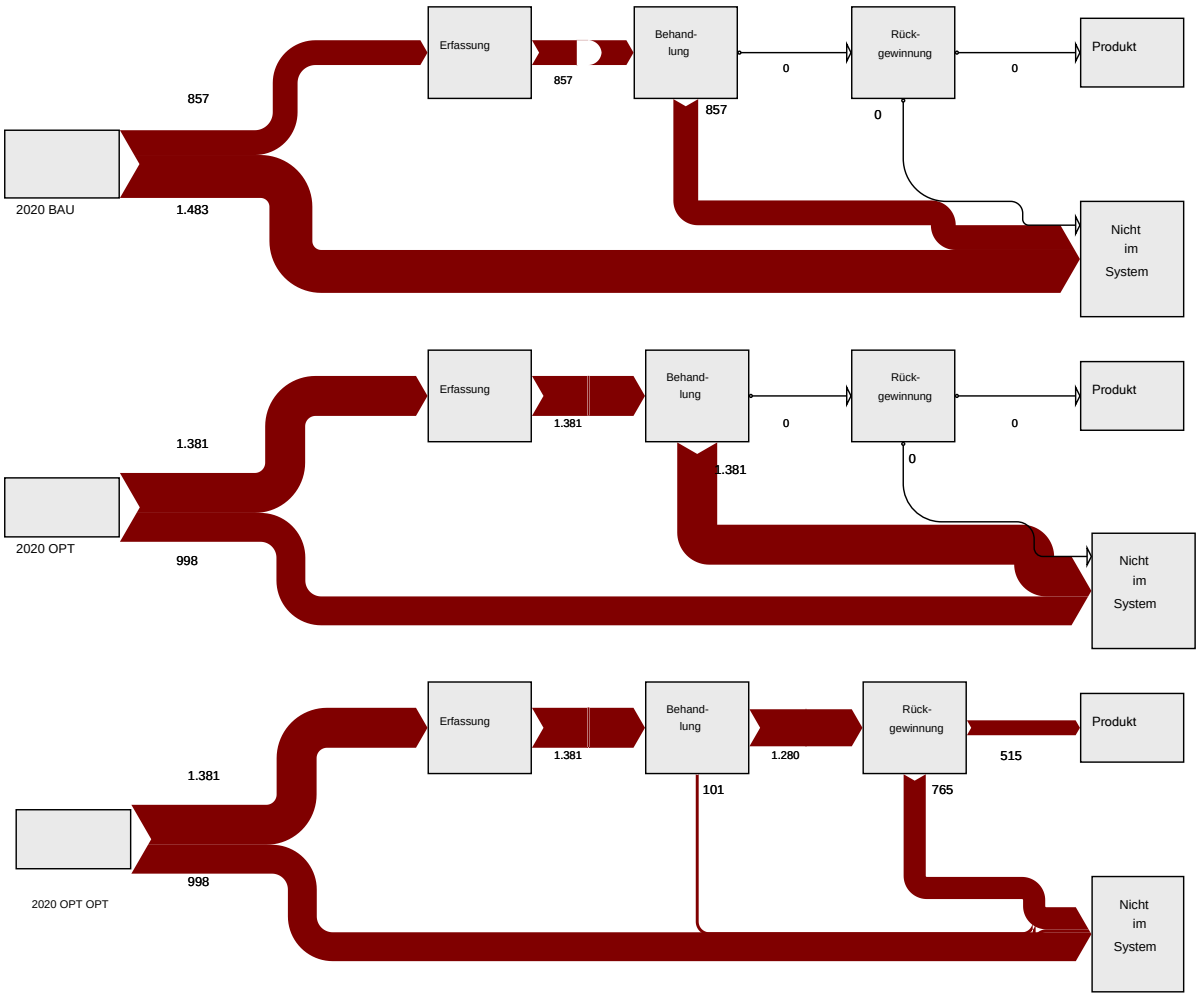
Quelle: eigene Darstellung

8.8 Zielelement In

Die Mengenstrombilanzen des Elements Indium verdeutlichen eine ähnliche Sachlage wie bei Neodym und Gallium. Indium wird bereits zu großen, wenn auch steigerungsfähigen Anteilen erfasst, doch gibt es derzeit keine effektiven und effizienten Behandlungsverfahren, die eine Rückgewinnung von Indium als sekundäre Rohstoff erlauben.

Mit der Etablierung der vorhandenen aber nicht industriell umgesetzten Verfahren könnte im OPT OPT-Szenario etwa ein Viertel des in EAG vorhandenen Indiums zurückgewonnen werden. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens wäre von der zukünftigen Kritikalität abhängig, so dass je nach technologischer Entwicklung mittelfristig Handlungsbedarf besteht.

Abbildung 177: In-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

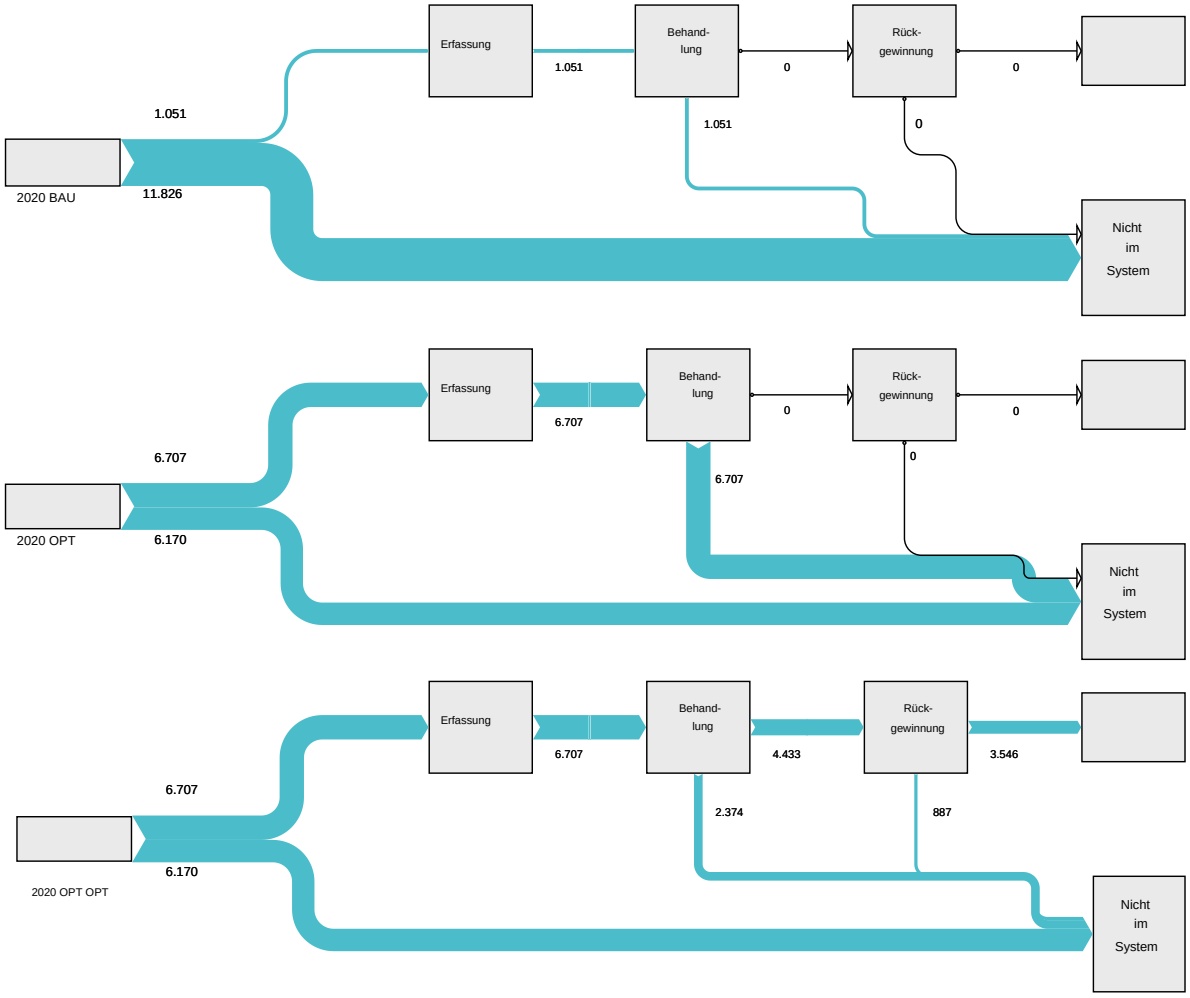


Quelle: eigene Darstellung

8.9 Zielelement Ta

Die Mengenstrombilanz von Tantal verdeutlicht, dass gemäß business as usual keine Tantalrückgewinnung erfolgt. Der Grad der Erfassung ist sehr gering und die erfasste Menge wird nicht zu Sekundärrohstoffen verarbeitet (Abbildung 178). Die Optimierung der Erfassung könnte zu einer Erfassung von 50 % führen und die zusätzliche Optimierung der Rückgewinnung könnte dazu führen, dass etwa ein Viertel des in RePro-Geräten vorhandenen Tantals in neue Produkte fließen könnte.

Abbildung 178: Ta-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a

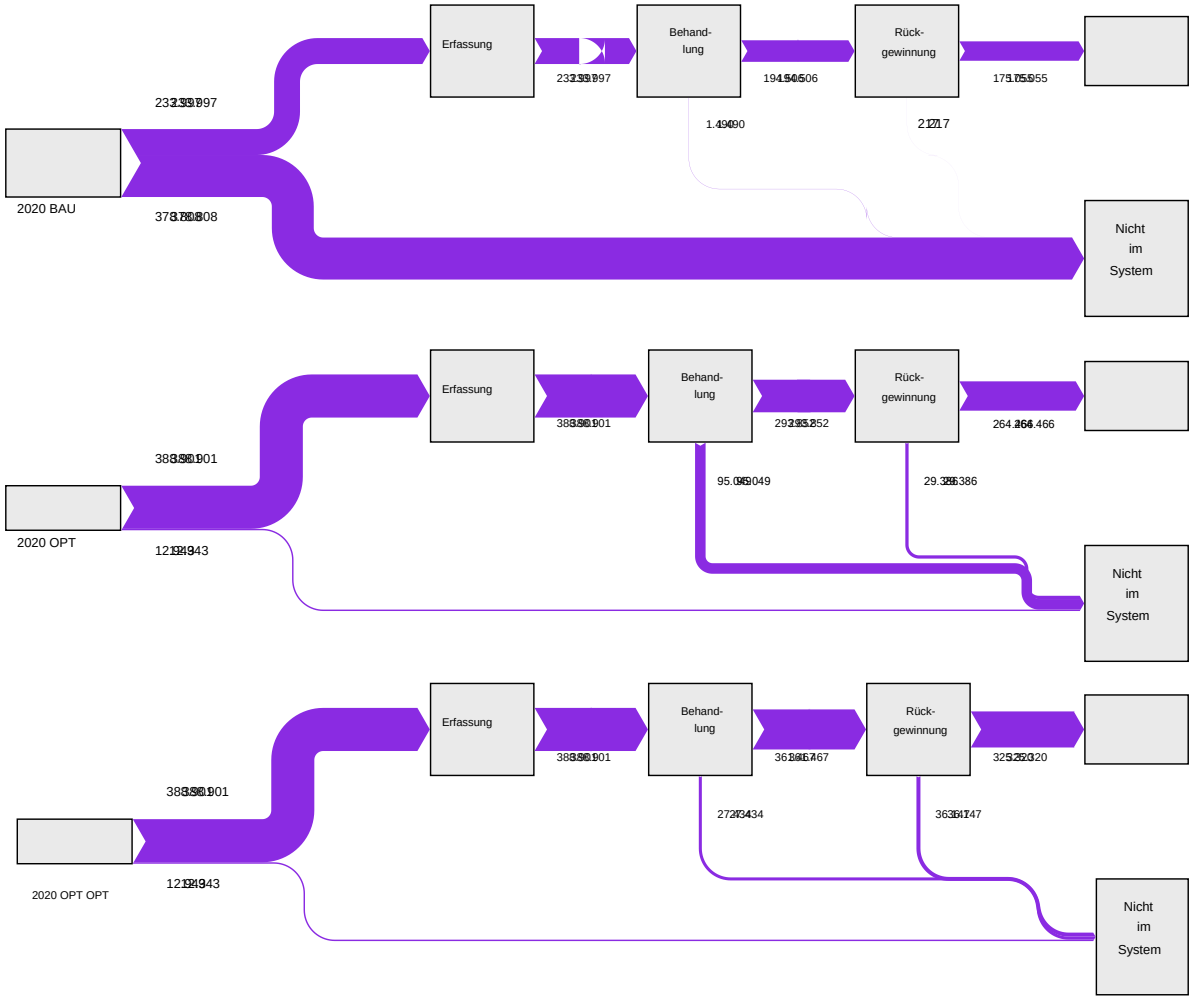


Quelle: eigene Darstellung

8.10 Zielelement Sn

Das Element Zinn, welches nur eine geringe Kritikalität aufweist und daher nicht als RePro-Metall aufgenommen wurde, wurde zusätzlich bezüglich der Mengenströme bilanziert. Die Diagramme der unterschiedlichen Szenarien verdeutlichen, dass bei einer Optimierung der Erfassung und Behandlung über 90 % des Zinns in Elektrogeräten als Sekundärmaterial zurückgewonnen werden könnte (Abbildung 179). Bei der Beibehaltung des business as usual würden nur etwa 30 % zurückgewonnen. Da eine sehr effiziente Rückgewinngungs- und Behandlungstechnik vorhanden ist und Zinn als Roh- wie Abfallstoff und derzeitig wie zukünftig mengenrelevant ist, sollte die optimierte Kreislaufführung dieses Elements angestrebt werden.

Abbildung 179: Sn-Mengenströme 2020 in RePro-Geräten. Szenarien: Business as usual (BAU), Optimierte Erfassung und Behandlung (OPT), Optimierte Erfassung und Behandlung mit optimistischen Annahmen (OPT OPT); Angaben in kg/a



Quelle: eigene Darstellung

8.11 Zielelement Sb

Derzeit bestehen Rückgewinnungsmöglichkeiten für Antimon aus Leiterplatten in integrierten Kupferhütten (Rückgewinnungseffizienz in der Größenordnung von 70 %). Die Zuführung von Leiterplatten erfolgt in der Regel aufgrund des Wertes der Edelmetallgehalte bzw. PGM-Gehalte.

Die gezielte Separation von Antimontrioxid aus Gehäusekunststoffen aus dem Bereich der EAG und die Rückgewinnung von enthaltenem Antimontrioxid zur Verwendung als Flammschutzmittel sind großtechnisch derzeit nicht verfügbar. In der Vergangenheit und aktuell erfolg(t)en einige Versuche.

8.12 Fazit der Mengenstrombilanzen

Sämtliche Mengenstrombilanzen verdeutlichten, dass das größte Potenzial zur Rückgewinnung und Ressourcensicherung in der Erfassung liegt, so dass dort durch Festlegung

von Organisationspflichten, Handlungsanleitungen und Öffentlichkeitsarbeit angesetzt werden sollte. Auf Geräteebene wurde festgestellt, dass PC und Fernsehgeräte vergleichsweise gut erfasst werden, während großes Steigerungspotenzial bei Mobiltelefonen, Smartphones, Laptops, Tablets, Videospielkonsolen und kleinen elektronischen Geräten besteht.

Die Behandlung und Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen aus Elektroaltgeräten sollte vorrangig auf Gold, Silber, Palladium und Zinn abstellen.

Kobalt und Yttrium sind Metalle die bereits durch die Anforderungen des ElektroG von der Erstbehandlung einem separaten Abfallstrom zuzuführen sind. Die sorgfältige Erfassung sollte nicht nur mit dem Ziel der Ressourcensicherung gefördert werden, sondern auch die gesetzlich vorgeschriebene Schadstoffentfrachtung des Abfalls sicherstellen. Yttrium wird bereits gut erfasst, könnte aber besser aufgearbeitet werden.

Gallium, Indium und Tantal werden derzeit kaum zurückgewonnen. Dies geschieht aufgrund der schlechten Erfassung aber auch in Ermangelung von Rückgewinnungsverfahren. Ob derartige Verfahren wirtschaftlich und sinnvoll sind, ist auch von ihrer Bedeutung für Zukunftstechnologien abhängig. Es sollten daher vorausschauend Rückgewinnungsverfahren entwickelt werden, so dass eine großtechnische Umsetzung und eine entsprechende Umleitung der Abfallströme bei Zunahme der wirtschaftlichen Bedeutung erfolgen kann.

Ähnliches gilt für Neodym, das je nach wirtschaftlicher Entwicklung ein bedeutender Abfallstrom werden könnte. Aus Sicht des globalen Umweltnutzens und der Nachhaltigkeit wäre eine effiziente und effektive Rückgewinnung und Kreislaufführung wünschenswert.

9 Quellenverzeichnis

Aha (2013): Pressemitteilung des NDR vom 14.03.2013 unter http://www.ndr.de/regional/niedersachsen/hannover/wertstofftonne127.html, Letzter Zugriff 17.04.2013

Albromet (2014): http://www.albromet.de, letzter Zugriff 16.08.2015

Althaus, H.-J.; Hischier, R.; Osses, M.; Primas, A.; Hellweg, S.; Jungbluth, N.; Chudacoff, M. (2013): Life Cycle Inventories of Chemicals, Rare earth oxide production from bastnasite. Ecoinvent, v2.0, https://db.ecoinvent.org/reports/08_Chemicals.pdf, letzter Zugriff 03.06.2017

Amazon (2013), Rasierapparat, http://www.amazon.de/s/ref=nb_sb_noss_2?__mk_de_DE=%C3 %85M%C3 %85Z%C3 %95 %C3 %91&url=search-alias%3Daps&field-keywords=rasierapperat, Letzter Zugriff 17.04.2013

Amazon (2013a), HP Laserjet M9050, http://www.amazon.de/Laserjet-M9050-monochrom-Laserdrucker-scan/dp/B003KLTNAY/ref=sr_1_54?s=computers&ie=UTF8&qid=1364297493&sr=1-54, letzter Zugriff 26.03.2013

Amazon (2013b), Samsung Star II, http://www.amazon.de/Samsung-Smartphone-Touchscreen-MP3 Player-onyx-black/dp/B004I8L8VU/ref=sr_1_2?ie=UTF8&qid=1365153609&sr=8-2&keywords=smartphone, letzter Zugriff 05.04.2013

Amazon (2013c), BenQ MS513 DLP-Projektor, http://www.amazon.de/BenQ-MS513-DLP-Projektor-Kontrast-10000/dp/B005MHXUOE/ref=sr_1_3?s=ce-de&ie=UTF8&qid=1365154805&sr=1-3&keywords=beamer, Letzter Zugriff 5.04.2013

Amazon (2013d), Epson EH-TW3200 LCD-Projektor, http://www.amazon.de/Epson-EH-TW3200-LCD-Projektor-Pixel-Kontrast/dp/B0046HAL6Q/ref=sr_1_23?s=ce-de&ie=UTF8&qid=1365154803&sr=1-23&keywords=beamer, letzter Zugriff 05.04.2013

Ando, A. W., & Gosselin, A. Y. (2007). Recycling in multifamily dwellings: does convenience matter?. Economic inquiry, 43(2), 426-438, https://experts.illinois.edu/en/publications/recycling-in-multifamily-dwellings-does-convenience-matter, letzter Zugriff 03.09.2017

Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. IRB Verlag, Stuttgart 2009

Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Wendl, M.; Wietschel, M. (2009a): Lithium für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Karlsruhe, Fraunhofer ISI

Apple (2013), iPhone 5, http://store.apple.com/de/buy/home/shop_iphone/family/iphone5, letzter Zugriff 05.04.2013

Asahi (2012): Asahi Holdings: Company Overview. In: Company Report 2012, http://www.asahiholdings.com/english/ir/report/document/pdf/12company.pdf, letzter Zugriff 08.03.2012

Aurubis (2011): Recycling, http://www.aurubis.com/index.php?id=872&type=98, Letzter Zugriff 17.05.2013

Aurubis (2012): Recyclingtechnik, http://www.aurubis.com/de/geschaeftsfelder/rohstoffe/recycling/technik/, letzter Zugriff 20.09.2012

Aurubis (2012a): Recyclingbroschüre, http://www. Aurubis.de, Letzter Zugriff 25.09.2012

Avfall Sverige (2010): Rapport U2010:08. Insamling av elavfall i butik Försök med insamling av elavfall i Samlaren under ett år, Stockholm

AWG (Abfallwirtschaftsgesellschaft Wuppertal) (2012): Neuer Service der Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal (AWG) zur Steigerung der Sammelquote von Elektro-Altgeräten aus Privathaushalten: Container für Elektro-Kleingeräte an allen Wertstoffstandplätzen. Wuppertal

Barner, L., Dräger, R., Gromer, G., Henze, T., Lauinger, S., Schemel, J., Stolzenberg, A., Woidasky, J. (2009) Hochwertige technische Polymercompounds aus E/E-Altgeräten, Pfinztal

Bast, U., Blank, R.,Buchert, M., (2015): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben. Kennwort: MORE (Motor Recycling): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben, Förderkennzeichen BMBF 03X4622 A-H

Batteriepool.de (2013): Pers Comm. Telefonische Auskunft am 17.05.2013

Bayern (2009): IW Consult (Hrsg.): Pfleger, P.; Lichtblau, K.; Bardt, H.; Reller, A.: Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V., München.

BDL (2013): Jahres- und Strukturdaten, http://bdl.leasingverband.de/zahlen-fakten/leasing-in-deutschland/jahres-und-strukturdaten, letzter Zugriff 27.03.2013

Beigl, P., Schneider, F., Salhofer, S. (2010): Vergleich von Sammelsystemen für Mobiltelefone, in: Müll und Abfall 10 2010

Beigl, P., Schneider, F., Salhofer, S. (2012): Vergleich von Sammelsystemen für Mobiltelefone, in: Müll und Abfall 10 2010

Berliner Stadtreinigung (2013): eBox – Elektrokleingeräte-Container. http://www.bsr.de/12717.html. Letzter Zugriff 23.04.2013

BeST (2012): Uses & Applications of Beryllium. http://beryllium.eu/about-beryllium-and-beryllium-alloys/uses-and-applications-of-beryllium/, letzter Zugriff 05.06.2012

BeST (2015): Recycling, http://beryllium.eu/health-environment-legislation/recycling/, letzter Zugriff 03.08.2015

BGR (2013): BGR: Rohstoffrisikobewertung Antimon – DERA Rohstoffinformation 18, Berlin, 2013, http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-18.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff 01.08.2017

Bitkom (2011), 50 Elektrogeräte und 7 Fernbedienungen pro Haushalt, http://www.bitkom.org/70363_69186.aspx, letzter Zugriff 14.01.2015

Bitkom (2011): Haushaltsausstattung, http://www.bitkom.org/70363_69186.aspx, letzter Zugriff 02.07.2015

Bitkom (2014): Erstmals mehr als 100 Millionen Alt-Handys zu Hause, http://www.bitkom.org/de/presse/81149_78445.aspx, letzter Zugriff 14.1.2015

Blanke, pers comm (2012): Telefonat Herr Blanke von der Vacuumschmelze GmbH am 11.07.2012

BMU (2012b): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht - BMU - FKZ 03MAP146. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); Ingenierbüro für neue Energien (IFNE). Stuttgart; Kassel; Teltow.

BMUB (2014): Umwelt im Unterricht Materialien zu aktuellen Themen, www.umwelt-im-unterricht.de letzter Zugriff 02.03.2016

Boerrigter, H., (2000): Implementation of thermal processes for feedstock recycling of bromine and antimony, with energy recovery, from plastics waste of electrical and electronic equipment (WEEE), Phase 1: Literature survey/status update, evaluation, and ranking of combustion, gasification, and pyrolysis based technologies, https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-C--00-114, letzter Zugriff 02.07.2017

Brother (2013): Leasing für Geschäftskunden, http://www.brother.de/g3.cfm/s_page/248170/s_name/mpsgeraete, letzter Zugriff 26.03.2013

Brusselaers, J., Mark, F.E., Tange, L. (2006): Using metal-rich WEEE plastics as feedstock/fuel substitute for an integrated metals smelter - A Technical Report produced by: PlasticsEurope in cooperation with Umicore, Cefic and EFRA, Brüssel, 2006

BSR (2012c): pers.com. basierend auf: Argus im Auftrag der BSR, Endbericht zur wissenschaftlichen Begleitung Einführung der Wertstofftonne/ Orange Box BSR in 2010/11, Oktober 2011 sowie Argus im Auftrag der BSR, Endbericht zur wissenschaftlichen Begleitung Orange Service, Projektphase I, Juni 2010

Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., & Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV- Fachbericht 38, Recklinghausen, 2012. http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe38/fabe38start.htm, letzter Zugriff 02.07.2017

Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential, http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf, letzter Zugriff 02.10.2017

Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (2014): Zahl der Privathaushalte und durchschnittliche Haushaltsgröße in Deutschland*, 1871 bis 2016, https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Lebensformen/Haushalte-Zahlen-Anteile.html, letzter Zugriff 10.08.2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB), Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2013): Umweltbewusstsein in Deutschland 2012, http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4396.pdf, letzter Zugriff: 18.11.2014

Bunge, R. (2014): Recycling von Neodym aus Elektronikschrott, HSR Hochschule für Technik Rapperswil. Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC, Rapperswil, http://www.umtec.ch/uploads/tx_hsrpm/Factsheet_E-Recmet.pdf, letzter Zugriff 02.06.2015

Buss & Buss (2012): Rare Metals Facilities, http://www.molycorp.com/about-us/our-facilities/rare-metals-facilities, letzter Zugriff 20.09.2012

CEMIX (diverse Jahre): Consumer Electronics Markt Index CEMIX, https://www.bvt-ev.de/Markt/index.php, letzter Zugriff 06.12.2018

Chancerel P. (2010): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. An assessment of the recovery of gold and palladium. Dissertation Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz, ITU-Schriftenreihe 09/2010, Berlin

Chancerel, Perrine; Bolland, Til; Rotter, Vera Susanne (2011): Status of pre-processing of waste electrical and electronic equipment in Germany and its influence on the recovery of gold. In: WASTE MANAGE RES 29 (3), S. 309–317

Chancerel, Perrine; Meskers, Christina E. M.; Hagelüken, Christian; Rotter, Vera Susanne (2009): Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. In: J IND ECOL 13 (5), S. 791–810.

Chancerel, Perrine; Meskers, Christina; Hagelüken, Christian; Rotter, Susanne (2008): E-scrap. metals too precious to ignore. In: Recycling International (November), S. 42–45

Chancerel, Perrine; Rotter, Vera Susanne (2009): Assessing the management of small Waste Electrical and Electronic Equipment through Substance Flow Analysis - The example of gold in Germany and the USA. In: IEEE I Symp Sust Sys, S. 380–385

CHEMIE (2015): Chemie.de: Elektroaltgeräte als Rohstoffquelle für Antimon und Titan nutzen, http://www.chemie.de/news/153245/, letzter Zugriff 01.07.2015

China Economic News Service (2010): LED marginalizes CCFL in backlight market: DisplaySearch. http://www.thefreelibrary.com/LED+marginalizes+CCFL+in+backlight+market%3A+DisplaySearch.-a0230774358, letzter Zugriff 03.05.2016

Cooper, T. & Mayers R. (2000). Prospects of household appliances. E-Scope Project

CR-Recycling (2013): WEEE-Sammelgruppen. http://cr-recycling.de/weee.html, Letzter Zugriff 22.05.2013

Darby, L., & Obara, L. (2005). Household recycling behaviour and attitudes towards the disposal of small electrical and electronic equipment. Resources, Conservation and Recycling, 44(1), 17-35

Destatis (2013): Bevölkerungsentwicklung, https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/LangeReihen/Bevoelkerung/lrbev05.html;jsessionid=19B1A90955BA129F29604F0CE27F6FF6.cae2, letzter Zugriff 04.04.2013

DESTATIS (2015): Genesis-Online Datenbank zum Außenhandel unter https://www-genesis.destatis.de/genesis/online; letzter Zugriff 04.05.2015

DG Entr (2010): Generaldirektion Unternehmen: Critical raw materials for the EU, http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report_en.pdf, letzter Zugriff 10.12.2012

DIE WELT (2007): Das Milliardengeschäft mit dem Einwegpfand. http://www.welt.de/wams_print/article883460/Das-Milliardengeschaeft-mit-dem-Einwegpfand.html. Letzter Zugriff 22.05.2013

Diederich, D., Daniel, J. (2007): Verwertungsmöglichkeiten von aufbereiteten Bildröhrengläsern, Ilmenau

Dill, S., Rößiger, V. (2010): Schichtdickenmessung dünner Gold- und Palladiumschichten auf Leiterplatten mit Röntgenfluoreszenz. In: Galvanotechnik 5/2010, S. 999-1004, http://www.helmut-fischer.de/globalfiles/de_galvanotechnik-05-2010.pdf

DIN 16171 (2010): Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden – Bestimmung von Spurenelementen mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS); Deutsche Fassung prEN 16171:2010

DIN 16174 (2010): Schlamm, behandelter Bioabfall und Boden – Aufschluss von mit Königswasser löslichen Anteilen von Elementen; Deutsche Fassung prEN 16174:2010

DIN 32645 (2008): Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen – Begriffe, Verfahren, Auswertung ; 2008

Displaysearch (2012): Market Report Small/ Medium Displays. Online verfügbar unter www.displaysearch.com, letzter Zugriff 20.10.2012.

Domina, T., & Koch, K. (2002). Convenience and Frequency of Recycling Implications for Including Textiles in Curbside Recycling Programs.Environment and behavior, 34(2), 216-238.

Dowa (2011), Dowa Holdings Co., Ltd. Annual Report 2011, http://www.dowa.co.jp/en/ir/library/annual.html, letzter Zugriff 02.02.2016

Dowa Group (2012): Annual Report 2012, http://www.dowa.co.jp/en/ir/library_annual.html, letzter Zugriff 01.03.2015

Druckerzwerge (2013): Laser-Druckerwartung, http://www.druckerzwerge.com/druckerreparatur/druckerwartung.html, letzter Zugriff 26.03.1023

Du, X., Graedel, T. (2011): Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. In: Journal of Industrial Ecology, Volume 15, Issue 6, S. 836-843

DUH (2013): Studie zum Handypfand und alternativen Modellen, Berlin, 2013

EAK Austria (2012): Pressemeldung, http://www.eak-austria.at/presse/PK/PRESSEKONFERENZ-20-09-2012.zip, letzter Zugriff 18.6.2014

ECHA (2015): Beryllium; http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-9ea3c1bc-9f6c-1bb2-e044-00144f67d031/DISS-9ea3c1bc-9f6c-1bb2-e044-00144f67d031_DISS-9ea3c1bc-9f6c-1bb2-e044-00144f67d031.html, letzter Zugriff 08.08.2015

Elektrocycling (2014): pers. Kom. mit Kai Kramer Elelktrocycling 02.04.2015

El-Kretsen (2011): Framtidens insamlingssystem för smått el-avfall. 2011

El-Kretsen und Elektronikåtervinning EAF (2014): VERKSAMHETEN 2014

Elsner, H. (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung „Grüner Technologien" gefährdet? Commodity Top News Nr. 36, BGR, Hannover

Elsner, H.; Melcher, F.; Schwarz-Schampera, U.; Buchholz, P. (2010): Elektronikmetalle - zu-künftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? Commodity Top News Nr. 33, BGR, Hannover

Environmental Protection Agency Ireland (EPA) (2014): WEEE Statistics for Ireland, http://www.epa.ie/national-wastestatistics/, letzter Zugriff 12.08.2016

epcos (2006): Multi Layer Ceramic Capacitors. http://www.epcos.de/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=247996,a=371442.html, letzter Zugriff 14.5.2010

epcos (2006): Multi Layer Ceramic Capacitors. http://www.epcos.de/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=247996,a=371442.html, letzter Zugriff 14.5.2010

Erdmann, L. (2012): Persönliche Mitteilung, unveröffentlichte Hintergrundtabelle zur Recyclingfähigkeit

Erdmann, L., Graedel, T. E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. Environ. Sci. Technol., 2011, 45 (18), pp 7620–7630

Expert Team to Support Waste Implementation (ESWI) (2010): Exemption for the use of cadmium in portable batteries and accumulators intended for the use in cordless power tools in the context of the Batteries Directive 2006/66/EC. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Wien, 2010

EU (2008): Europäische Kommission: Commission staff working paper accompanying the Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast) – Impact Assessment, COM(2008) 810 final, SEC(2008) 2934

EU (2010): Europäische Kommission: Critical raw materials for Europe. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/system/files/ged/79%20report-b_en.pdf , letzter Zugriff 09.02.2014

EU (2014): Europäische Kommission: Flash Eurobarometer 388 – Attitudes of Europeans towards Waste Management and Resource Efficiency, http://ec.europa.eu/public_opinion/flash/fl_388_en.pdf, letzter Zugriff 18.11.2014

European Parliament (2012), Leasing Society, http://www.europarl.europa.eu/committees/en/envi/studiesdownload.html?languageDocument=EN&file=79330, November 2012

EUWID (2013): EUWID Recycling und Entsorgung 4.2013 S. 5

Fachzeitschrift für Metallurgie (2011): Umicore and Rhodia develop unique rare earth recycling process for rechargeable batteries, 23. Juli 2011, www. Metal-web.de, letzter Zugriff 14.07.2014

FairNews (2010): Pressemitteilung von solute GmbH, http://www.fair-news.de/pressemitteilung-130249.html, letzter Zugriff 31.08.2010

FEM 2015: pers.com. Dr. Völker FEM, 11.5.2015

Fishbein, B.K., McGarry, L.S., Dillon, P.S. (2000), Leasing: A Step Towards Producer Responsibility, New York, 2000

Folz, D. H. (1991). Recycling program design, management, and participation: a national survey of municipal experience. Public Administration Review, 222-231.

Frankfurter Rundschau (2012): Artikel unter URL: http://www.rundschau-online.de/bergisches-land/stadt-bergisch-gladbach-elektro-diebenden-kampf-angesagt,16064474,16644946.html, letzter Zugriff 02.02.2015

Fraunhofer IZM (2007a): EuP Preparatory Studies “Imaging Equipment” (Lot 4) Report on Task 6. “Technical Analysis BAT”

Friedrichs, O. (2012): Freiwilliges Rücknahmesystem fü Elektrokleingeräte & Energiesparlampen (Paragraf 9 ElektroG). Präsentation 12. September 2012, Hamburg.

Gallenkemper, B., Breer, J. (2010): Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2007 und 2008 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2010, UBA Forschungsvorhaben FKZ: 3709 31 330, Dessau, 2010

Gallenkemper, B., Breer, J. (2013): Analyse der Datenerhebung nach ElektroG über die Berichtsjahre 2009 und 2010 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflicht 2012, UBA Forschungsvorhaben FKZ: 3711 31 317, Dessau, 2013

Gantner (2013): Wissenschaftliche Begleitung der Althandy-Sammelaktion “Handy clever entsorgen”, Universität Augsburg, Augsburg, 2013

Gensch, O., Baron, Y., Blepp, M., Bunke, D., Moch, K. (2014): Study for the Review of the List of Restricted Substances under RoHS 2 - Analysis of Impacts from a Possible Restriction of Several New Substances under RoHS 2; http://www.oeko.de/oekodoc/2046/2014-627-en.pdf, letzter Zugriff November 2014

Gesetzentwurf der Bundesregierung (2015): Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektrog_novelle_gesetzentwurf_bf.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2015.

Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. UBA-Texte Nr. 01/2012. Dessau 2012

Gille, G.; Meier, A. (2012): Recycling von Refraktärmetallen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. ; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 556. Mit freundlicher Genehmigung des TK Verlags Karl Thomé-Kozmiensky

Goedkoop, M., van Halen, C.J.G., te Riele, H.R.M., Rommens, P.J.M. (1999): Product service systems, ecological and economic basics, http://teclim.ufba.br/jsf/indicadores/holan%20Product%20Service%20Systems%20main%20report.pdf, letzter Zugriff 02.10.2016

Gößling-Reisemann, Stefan; Knak, Markus; Björn, Schulz (2009): Lifetimes and copper content of selected obsolete electric and electronic products. In: Lorenz Hilty, Xaver Edelmann und Arthur Ruf (Hg.): Resource Management and Technology for Material and Energy Efficiency. R09 Twin World Congress. Davos. Dübendorf, Schweiz.

Germany Trade & Inves (GTAI) (2010): Deutschland präsentiert sich gut ausgeleuchtet, http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=73586.html, letzter Zugriff 15.12.2010

Gunt (2012): Gunt Hamburg, Thermische Verfahrentechnik, www.gunt.de/download/extraction_german.pdf, letzter Zugriff 12.07.2012

H.C. Starck (2009): H.C Starck Firmenbroschüre, Umweltgerecht, kompetent, einzigartig, High-Tech-Recycling für Refraktärmetalle, 03/2009

Hagelücken C. (2012) per.com.. 2012; 13.12.2012

Hagelüken, C. (2005), Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling von Katalysatoren, in: Autoabgaskatalysatoren, Expert Verlag, 2005

Hagelüken, C. (2006), Recycling of electronic scrap at Umicore prescious metals refining. From Acta Metallurgica Slovaca 12, 2006, Seiten 111-120

Hagelüken, C. (2006): RECYCLING OF ELECTRONIC SCRAP AT UMICORE PRECIOUS METALS REFINING, Acta Metallurgica Slovaca, 12, 2006, (S. 111 - 120)

Hagelüken, C. (2013): Recycling of precious and special metals, in Factor X- Re-source-Designing the recycling society, Angrick, M, Burger, A., Lehmann, H. (Hrsg.), Springer Dordrecht Heidelberg New York London

Hagelüken, C. (2015): pers.com. C. Hagelüken, UMICORE Juni 2015

Handelsblatt (2010): Millionen-Gewinne durch Einwegpfand. http://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-dienstleister/einzelhandel-millionen-gewinne-durch-einwegpfand/3499108.html. Abgerufen am 22.05.2013.

Handelsblatt (2013), Die Manie des Neuen, in: Handelsblatt vom 04.04.2013, S.1,4,5

Hartleb, Uta & Souren, Rainer (2011): Recycling von Einweggetränkeverpackungen in Deutschland: Gesetzliche Regelungen und Funktionsweise des implementieren Pfandsystems. Ilmenau.

Hatch, G. P. (2011): Critical Rare Earths. TMR technology metals research, August 2011, http://www.tech-metalsresearch.com/the-tmr-critical-rare-earths-report/, letzter Zugriff 09.10.2016

Hayashi, T. (2013): pers. comm 2013, Email von Takahiro Hayashi, Dowa-Gruppe, 03.07.2013

Hieronymi, K. (2012): The Role of CRM in the Office Equipment Industry, Presentation at Euromines Critical Materials Conference, Brussels March 9th 2012

Himmel, F. (2015): Aufbereitungs-Verfahren für Antimon aus Elektro- und Elektronikschrott, http://www.ifa.tu-clausthal.de/lehrstuehle/lehrstuhl-fuer-rohstoffaufbereitung-und-recycling/forschung/aktuelle-projekte/avantie/ letzter Zugriff 01.09.2016

Hitachi (2011): Firmendarstellung, http://www.hitachi.com/rev/field/other_sp_numbers/__icsFiles/afieldfile/2011/10/25/r2011_06_109.pdf, letzter Zugriff 07.11.2014

Hitachi Ltd.(2010), Hitachi develops recycling technologies for rare earth metals – Developing machineries to separate and collect rare earth magnets from end of life products, extracting rare earths from rare earth magnets using a dry process, Tokyo, December 6, 2010, press release, http://www.hitachi.com/New/cnews/101206.html, letzter Zugriff 07.03.2015

Hobohm, J./ Kessel, K./ Kuchta, K. (2012) Recover Potential of Rare Earth Metals in Displays. Vortrag auf der RRSWM am 5.6.2012, Istanbul

Hornik, J., Cherian, J., Madansky, M., & Narayana, C. (1995). Determinants of recycling behavior: A synthesis of research results. Journal of Socio-economics, 24(1), 105-127

HP (2013a), HP Store: Geschäftskunden, http://h20386.www2.hp.com/GermanyStore/Merch/List.aspx?sel=PBDT&p=9, 26.03.2013

Huisman, J. (2012): The Dutch WEEE Flows. Bonn 2012.

Huisman, J., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Ogilvie, Steve, Poll, Jim, Delgado, C., Artim, E., Szlezak, Josef, Stevels, Ab. (2007): 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). United Nations University (UNU), Bonn 2007

Hülter, K. (2013): Endbericht zum Pilotvorhaben „Einführung der Wertstofftonne in der Region Hannover“, Hannover, 2013

HydroWEEE (2011), Broschüre für die Green Electronics Tagung 2011, Bukarest

Institut Wohnen Und Umwelt GmbH (IWU) und Bremer Energie Institut (2010):: Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand, Darmstadt, 2010

Intecus (2013) per.com. 2013, Email von Fr. Heidrich, 05.04.2013

Intlekofer, K., Bras, B., Ferguson. M. (2010): Energy Implications of Product Leasing, in: Environmental Science and Technology (12/2010), S.4409-4415

IT-Business (2010): Im Storage-Markt steigen die Verkaufszahlen wieder, http://www.it-business.de/index.cfm?pid=2275&pk=282825, letzter Zugriff: 02.08.2010

IVF 2007: IVF Industrial Research and Development Corporation: Preparatory studies for Eco-design Requirements of EuPs (Contract TREN/D1/40-2005/LOT3/S07.56313) Lot 3 Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Final Report (Task 1-8), Brüssel, 2007

Iyer, E. S., & Kashyap, R. K. (2007). Consumer recycling: Role of incentives, information, and social class. Journal of Consumer Behaviour, 6(1), 32-47.

IZM (2012) pers.com.: Schlösser, A. pers. Com. zum Altgeräteaufkommen am 25.06.2012

IZT, adelphi (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Studie im Auftrag der KfW. Berlin.

Janz A. (2010): Schwermetalle aus Elektrogeräten und Batterien im kommunalen Restabfall, Dissertation, Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Eigenverlag, Band 69, Pirna 2010

Janz, A. (2009): Grenzüberschreitende Ströme von Elektroaltgeräten; in: Müll und Abfall, 3/09, P. 126-132

Janz, A., Bilitewski, B. (2007): Elektrische und elektronische Altgeräte im Restabfall nach Umsetzung des ElektroG, in: Müll und Abfall 07/07

Jehle, B. (2011): Aufbau einer großtechnischen Anlage zur Zerlegung von Kathodenstrahlröhren, BMU Umweltinnovationsprogramm, UBA Forschungsbericht AP 20090, Dessau, 2011

Johnson Matthey (2012): Platinum 2012. Online verfügbar unter http://www.platinum.matthey.com/uploaded_files/PT_2012/platinum_2012_publication.pdf, letzter Zugriff 02.11.2012.

JRC (2011): Institute for Energy and Transport of the Joint Research Centre (JRC): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Online unter: http://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/copy_of_jrc-report-on-critical-metals-in-strategic-energy-technologies/at_download/Document, letzter Zugriff 08.02.2012

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 263-291.

Karlsruhe (2009): „Elektrogeräte sind kein Sperrmüll“, , Amt für Abfallwirtschaft, Karlsruhe, 2009, www.karlsruhe.de/abfall, letzter Zugriff 18.11.2014

Kerckhoven, T. (2014): Optimizing (precious) metal recovery out of electronic scrap, Vortrag bei der Konferenz Electronics Recycling Asia, 13.11.2014

Kreis Große-Gerau (KGG) (2013): Pressemitteilung des Kreises Große-Gerau vom 18.04.2013 www.kreisgg.de/buergerservice/pressemitteilungen/, letzter Zugriff 13.11.2014

Kingsnorth, D. J. (2012): The Global Rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act. Vortrag bei der Deutschen Rohstoffagentur am 16. April 2012, Berlin

Knudson, T. (2008): A Qualitative Overview of the Use of Beryllium, Beryllium-Containing Alloys and Beryllium oxide Ceramic in Electrical and Electronic Equipment (EEE); http://hse-rohs.oeko.info/fileadmin/user_upload/Subst_Beryllium/Be_and_BeO_BrushWellmann.pdf, letzter Zugriff 04.09.2014

Kuhn, M. (2012): Recycling auf Rädern. Recycling Magazin, Ausgabe 13, 2012

Lange, U. (2012): persönliche Auskunft, Lange, U. TU Dresden, März 2012

Lange, U. (2013): Auswirkungen informeller Sammlungen auf die EAG-Rücknahme, Vortrag auf dem Expertenworkshop zur Sammlung von ressourcenrelevante Elektroaltgeräten, Projekt RePro, Berlin, 2013

Lassner E., Schubert, W.-D. (2009): Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York

Lauridsen, E. H., Jorgensen, U. (2010): Sustainable transition of electronic products through waste policy. Research Policy 39/2010, 486–494

LCM (2012): Less common metals, http://www.gwmg.ca/html/less-common-metals-section/products/co-reduced/index.cfm, letzter Zugriff 16.03.2012

Leasingshop24 (2013): Office PC, http://www.leasingshop24.de/Computer-Leasing/Office-PC/2/, letzter Zugriff 26.03.2013

Leitlinien (2007): Geänderte Anlaufstellen-Leitlinien Nr 1 über die Verbringung von Elektroaltgeräten zur EG-Abfallverbringungsverordnung, http://www.umweltdaten.de/abfallwirtschaft/gav/Anlaufstellen_Leitlinien_Nr_1.pdf, Letzter Zugriff 14.06.2016

LessCommonMetals: Telefonat mit Dave Murphy, Comercial Director

Li, Y. (2012): Das Recycling krititscher Metalle aus Elektronikaltgeräten. Masterarbeit an der TU, FB Raum- und Infrastrukturplanung. Darmstadt.

Lim, S-R., Kang, D., Ogunseitan, O.A., Schoenung, J.M. (2012): Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs, Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (2), pp 1040–1047, Publication Date (Web): December 13, 2012 (Article), DOI: 10.1021/es302886m

Liu, R., Buchert, M., Dittrich, S., Manhart, A., Merz, C., Schuler, D. (2011). Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling. 10.1109/ICCE-Berlin.2011.6031826. s.

Loser Chemie (2011): Recycling. http://loserchemie.de/innovationen.html, letzter Zugriff 20.09.2012

Luipold, S., Poscher, A., Kaindl, M. (2013): Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen in: Recycling und Rohstoffe – Band 6, Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D.. Neuruppin: TK Verlag, 2013.

Magalini, F.,Huisman, J., Wang, F. (2012): Household WEEE generated in Italy - Analysis on volumes & consumer disposal behavior for Waste Electrical and Electronic Equipment, http://www.weee-forum.org/system/files/2012_ecodom_weee_arising_in_italy_en.pdf, letzter Zugriff 16.02.2017

Manhart, A., Riewe, T., Brommern, E. (2012): PROSA Smartphones Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen, Freiburg, 2012

MaRess (2011): Materialeffizienz und Ressourcenschonung, Abschlussbericht des AP 2 „Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen“, Wuppertal Institut. http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_8_AbschlussBer.pdf

Märkische Oderzeitung (2012): Mehrweg verliert im Dosenkrieg. http://www.moz.de/artikel-ansicht/dg/0/1/1006738/. Letzter Zugriff 22.05.2013.

Materion (2014): Firmendarstellung, http://www.materion.de.com, letzter Zugriff 04.08.2015

Maurell-Lopez, S.; Ayhan, M.; Eschen, M.; Frierich, B. (2012): Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. ; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 419 (hier wird verwiesen auf die Quelle: Ausmelt/Isasmelt Matte Smelting: Part Two, http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=268 vom 04.01.2012)

Mawey (2013): Bianchi LEI 700 Kaffeevollautomat, http://www.mavey.de/Kaffeeautomaten/Bianchi-LEI-700-Kaffeevollautomat.html, 5.04.2013

Meskers, C. (2015): pers.com. C. Meskers, UMICORE Juni 2015

Meskers, C.E.M., Hagelüken, C., Salhofer, S., Spitzbart, M., (2009): Impact of pre-processing routes on precious metal recovery from PCs. In: Jens Harre (Hg.): European Metallurgical Conference EMC 2009. June 28 - July 1, Innsbruck, Austria : proceedings. Clausthal-Zellerfeld: GDMB, S. 527–540.

MetalDepot (2015): Metal Depot: Das Schweizer Depot für Industriemetalle, Zürich, 2015, http://www.metaldepot.ch/images/download/Brochure_DE.pdf, letzter Zugriff: 01.09.2015

MHB (2013): Gallenkemper, B., Middendorf, R.: Erfahrungen mit Bringsystemen, in: MuA Lfg 6/93 Müllhandbuch Tz 2867 Onlineausgabe, Berlin, 2013

Miljö & Avfalls Byrån (2012): PM Undersökning om insamlingssystem för elavfall i Sverige 2012.

Mitsui (2013): Firmendarstellung, http://www.mitsui-kinzoku.co.jp/group/mkr/en/jigyo.html, letzter Zugriff 03.07.2013

Mitsui Kinzoku Group: Firmendarstellung, http://www.mitsui-kinzoku.co.jp/en/seihin/s_meta.html, letzter Zugriff 03.07.2013

MoE and METI (Ministry of Environment and Ministry of Economy, Trade and Industry) (2010): Report of the Study Group for Less Common Metal Recovery from Used Small Electric Appliances 2009 (in Japanisch)

Mohite, S., Zhang, H.C. (2005): Disassembly Analysis, Material Composition Analysis and Environmental Impact Analysis for Computer Drives, in: ISEE 2005 0-7803-8910-7/05/, http://ecoinfo.cnrs.fr/IMG/pdf/disassembly_analysis_material_composition_analysis.pdf, letzter Zugriff 08.08.2010

Montanwerke Brixlegg (2012): Pyrometallurgie, http://www.montanwerke-brixlegg.com/de/produktion/pyrometallurgie/, letzter Zugriff 20.09.2012

Morf, L., Taverna, R. (2004): Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott. Stofffflussanalyse. Hg. v. Wald und Landschaft (BUWAL) Bundesamt für Umwelt, Bern

Moss, R. L.; Tzimas, E.; Kara, H.; Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Hg. v. Joint Research Center, European Commission, Brüssel

Mudgal, S. Le Guern, Y., Tinetti, B., Chanoine, A., Pahal, S., Witte, F. (2011): Comparative Life-Cycle Assessment of nickel- cadmium (NiCd) batteries used in Cordless Power Tools (CPTs) vs. their alternatives nickel-metal hydride (NiMH) and lithium-ion (Li-ion) batteries. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Endbericht. Brüssel.

Müller, E., Schluep, M., Widmer, R., Gottschalk, F. (2009): Assessment on e-waste flows: a probabilistic approach to quantify e-waste based on world ICT and development indicators. Empa, Laboratory for Technology and Society, Bern

Müller, Esther; Widmer, Rolf (2010): Materialflüsse der elektrischen und elektronischen Geräte in der Schweiz. Unter Mitarbeit von Marco Buletti und Susan Glättli. Hg. v. Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Murakami, S., Oguchi, M., Tasaki, T., Daigo, I., Hashimoto, S. (2010): Lifespan of commodities, Part I, Journal of Industrial Ecology, Volume 14, Number 4, 2010

NABU (2011): „Alte Handys für die Havel“, NABU & Eplus-Gruppe, www.nabu.de, 2011, letzter Zugriff: 18.11.2014

Nakajima, K. Takeda, O. Miki, T. Matsubae, K., Nagasaka, T. (2011). Thermodynamicanalysis for the controllability of elementsin Recycling process of metals.Environmental Science & Technology,vol. 11, pp. 4929 – 4936in:

UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Nakajima, K. Takeda, O. Miki, T. Nagasaka, T. (2009): Evaluation method of metalresources recyclability based on thermodynamicanalysis. Materials Transactions,vol. 50, pp. 453 – 460in: UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Nakajima, K. Yokoyama, K. and Nagasaka, T. (2008): Substance flow analysis of zincassociated with the iron and steel cyclein Japan. ISIJ International, vol. 48, pp. 1478 – 1483 in: UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Nakamura, S. and Nakajima, K. (2005):Wasteinput-output material flow analysisof metals in the Japanese economy,Materials Transactions, vol. 46,pp. 2550 – 2553in: UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Nakamura, S. Nakajima, K. Kondo,Y. and Nagasaka, T.(2007): The waste inputoutputapproach to material flow analysis:Concepts and application to basemetals. Journal of Industrial Ecology,vol. 11, pp. 50 – 63in: UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

NDR (2013). Eine Wertstofftonne für die Landeshauptstadt. http://www.ndr.de/regional/niedersachsen/hannover/wertstofftonne127.html. Abgerufen am 23.04.2013.

Neubauer, A. (2014): Erfahrungen mit Depotcontainern, Vortrag beim Expertenworkshop zur Sammlung von ressourcenrelevanten Elektroaltgeräten, Projekt RePro, Berlin, 2014

NGK (2014): Firmendarstellung, http://www.ngkdbg.de, letzter Zugriff 08.08.2015

NIES. (2010). Lifespan database for Vehicles, Equipment, and Structures: LiVES. Retrieved from http://www.nies.go.jp/lifespan/index-e.html, letzter Zugriff 02.10.2014

Nolte, A. (2015): pers.com. A. Nolte, AURUBIS, Juni 2015

Nomura, K. (2005): Duration of Assets: Examination of Directly Observed Discard Data in Japan. KEO Discussion Paper No. 99.

NRC (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, Committee on Earth Resources, National Research Council of the National Academies. Online unter: http://www.nap.edu/catalog/12034.html, letzter Zugriff 25.01.2011.

NYT (2010): Japan Recycles Minerals From Used Electronics, http://www.nytimes.com/2010/10/05/business/global/05recycle.html?pagewanted=2&_r=0, Published: October 4, 2010

Ö3 (2013): Das ist das Wunder der Ö3-Wundertüte. http://oe3.orf.at/aktionen/stories/542142/. Abgerufen am 15.05.2013.

Oakdene Hollins (2010): Lanthanide Resources and Alternatives. http://www.scribd.com/doc/60245221/19/Rare-Earth-Magnets, letzter Zugriff 12.03.2016

Oakdene Hollins (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering critical raw materials through infrastructure development in the south east of England 2011.

Oberleitner, W. (2012): Email von Wolfgang Oberleitner, Treibacher AG, 19.07.2012

OECD (2001): Measuring Capital - OECD Manual. Measurement of capital stocks, consumption of fixed capital and capital services. Hg. v. OECD. Oguchi, Masahiro; Kameya, Takashi; Yagi, Suguru; Urano, Kohei (2008): Product flow analysis of various consumer durables in Japan. In: Resources, Conservation and Recycling 52 (3), S. 463–480.

Oguchi, M. (2012): Metal composition of WEEE: A review of empirical data and use in material flow analysis. Vortrag auf der MFA ConAccount, 27. September 2012, Darmstadt.

Oguchi, M., Kameya, T., Yagi, S., & Urano, K. (2007). Product flow analysis of various consumer durables in Japan. Institute of Environment and Resource Systems Inc., Yokohama National University.

Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., & Kameya, T. (2011). A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources . National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo, Yokohama National University.

OÖ Landesabfallverband (2010): „Wegwerfen gefährdet unsere Umwelt“, Altstoffsammlung in Österreich 2010, Umweltprofis Österreich, www.ooe-bav.at/start.html, letzter Zugriff: 18.11.2014

Peters, Schmidt-Burgk (2007): Das Leasinghandbuch, Köln, 2007

PHOTON (2012): Das Solarstrommagazin. April 2012 - Anteile der verschiedenen Zelltechnologien, weltweite Solarzellenproduktion 1999 bis 2011. In: Photon Das Solarstrom Magazin (4).

PPM: Recycling (2012): Firmendarstellung, http://www.ppmpuremetals.de/PPM_deutsch/products/recycling/recycling.php?inhalt=inhalt_rc.htm, letzter Zugriff 20.09.2012

Prakash, S., Gröger, J. (2017): Ermittlung und Erschließung des Energie- und Ressourceneffizienzpotenzials von Geräten der Unterhaltungselektronik, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3711 95 313, UBA-TEXTE 11/2017, Dessau, 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2017-02-01_texte_11-2017_e-effizienz-unterhaltungselektronik.pdf, letzter Zugriff 20.12.2017

Pretz, T. (2013): Pretz, T.: pers.com. Februar 2013

Rat für Nachhaltige Entwicklung (2011): Wie Deutschland zum Rohstoffland wird, http://www.nachhaltigkeitsrat.de/uploads/media/RNE_Rohstoffland_Deutschland_texte_Nr_39_Juni_2011_01.pdf, letzter Zugriff 01.06.2011

RECHARGE (2010): The Rechargeable Battery (PRB) market in Europe (2008-2015), https://www.rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2013/07/Portable_Rechargeable_Battery_Market_in_Europe__2008-2015_-_Jan_2011.pdf, letzter Zugriff 04.05.2016

Recycling Magazin (2012): Recycling Magazin: Urban Mining im Pulver, Seite 20-21, Ausgabe 05/2012www.recyclingmagazin.de/rm/magazin_artikel.asp?ID=3099&SID=445798192168100100

Reuter, M.A., Van Schaik A (2012a): Opportunities and Limits of recycling – A Dynamic-Model-Based Analysis. MRS Bulletin, vol. 37(4), pp. 339 – 347 (special edition on Sustainability)

Reuter, M.A., Van Schaik A. (2012b): Opportunities and Limits of WEEE Recycling –Recommendations to Product Design from a Recyclers Perspective. Proceedings for Electronics Goes Green 2012, Eds. Klaus-Dieter Lang, Nils F. Nissen, Andreas Middendorf, Perrine Chancerel, Berlin, Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration IZM, Berlin Technische Universität Berlin, Research Center for Microperipheric Technologies, Paper A.5.3 (2012b).

Rhein Hunsrück Entsorgung (2013). Wertstofftonne für Elektrokleingeräte. http://rh-entsorgung.de/page.php?page=/rhe/leistungen/elektrotonne.html. Letzter Zugriff 23.04.2013.

Rhodia (2011): Rhodia and Umicore: Umicore and Rhodia develop unique rare earth recycling process for rechargeable batteries. Press Release. http://www.rhodia.com/en/news_center/news_releases/Umicore_rare_earth_160611.tcm, Juli 2012

Rhodia (2012a): Solvent Extractions. http://www.rhodia.com/en/binaries/silcea_liquid_liquid_extraction_EN.pdf, letzter Zugriff 16.03.2012

Rhodia (2012b): Expertise & Innovation. http://www.rhodia.com/en/markets_and_products/product_ranges/Rare_Earths_Expertise_and_Innovation.tcm, letzter Zugriff 16.03.2012

Rhodia (2013): Presentation of Mr. Carencotte of Solvay/Rhodia at the 12th International Electronics Recycling Congress IERC 2013, January 16 – 18, 2013, Salzburg, Austria

Rhodia (2013a): pers. Comm., Telefonat am 10.10.2013 mit Herrn Carencotte, Industrial Director of Rhodia Rare Earth Systems

Risk and Policy Analysts Ltd (RPA) (2012): Study on Data Needs for a Full Raw Materials Flow Analysis, Framework Services Contract ENTR/2008/006/LOT 1, prepared for DG Enterprise and Industry, Brüssel

Robinson, Brett (2009): E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. Department of Soil and Physical Sciences, Lincoln University, Canterbury, New Zealand. Accessed through www.elsevier.com

Roland Berger (2008): Experience with the introduction of a mandatory deposit system in Germany. Bu-dapest. (Vortragsfolien für eine Veranstaltung in Budapest)

Römpp (2012): online Version des Chemielexikons unter http://www.roempp.com, letzter Zugriff 02.10.2015

Roskill (2011), Roskill Information Services Ltd: Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015. Fourteenth Edition, London.

Rotter, V.S.; Flamme, S.; Ueberschaar, M.; Götze, R. (2012): Thermodynamische Herausforderung bei Recycling von Nebenmetallen. In: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Band 5. Neuruppin. S. 537-560.

RPA (2008): Study in the field of non-energy raw materials. Prepared by RPA. RWI Essen for the European Commission. September 2008.

Sachsen (2010): Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg; Richtlinie z. einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen

Salhofer, S., Spitzbart, M., Meskers, C., Hagelüken, C., Schöps, D., Kriegl, M., Panowitz, G., (2009): Vergleich von manueller Demontage und mechanischer Aufbereitung von PCs.

Sander, K., Gößling-Reisemann, S., Zimmermann, T., Marscheider-Weidemann, F. (2016): Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären strategischen Metallen durch Sekundärmaterialien (Kurztitel: Recyclingpotenzial strategischer Metalle) - ReStra -, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3711 93 339, Dessau, 2016

Sander, K., Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten/Elektroschrott, im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 11/2010, Dessau, 2010, http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3769.pdf

Sander, K., Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten/Elektroschrott, UBA FKZ 3708 93 300, Dessau, 2010, http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-steuerung-kontrolle, letzter Zugriff: Mai 2015

Sander, K., Schilling, S., Wagner, J., Günther, M. (2015): Maßnahmen zur Optimierung der Entsorgung von quecksilberhaltigen Gasentladungslampen und anderen Lampenarten, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3712 33 306, TEXTE

03/2015, Dessau-Rosslau, 2015, https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmen-zur-optimierung-der-entsorgung-von, Zugriff Mai 2017

Saphores, J. D. M., Nixon, H., Ogunseitan, O. A., & Shapiro, A. A. (2006). Household Willingness to Recycle Electronic Waste An Application to California. Environment and Behavior, 38(2), 183-208.

Schäfer, R. (2012): Der kundenorientierte Wertstoffhof – wichtiger Bestandteil kommunaler Ab-fallwirtschaft. Fachseminar des Umweltkontors am 26. April 2012 in Berlin, Verband kommunaler Unternehmen e.V. Abfallwirtschaft und Stadtreinigung VKS, Berlin

Scharnhorst, W., Althaus, W., Classen, M. (2005): The end of life treatment of second generation mobile phone networks: Strategies to reduce the environmental impact. Environmental Impact Assessment Review 25 (2005), S. 540– 566.

Shin Etsu (2009): Rare Earth Magnet Applications. http://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/application/, letzter Zugriff 13.09.2016.

Schlacke, S., Stadermann, M., Grunow, M. (2012): Rechtliche Instrumente zur Förderung des nachhaltigen Konsums – am Beispiel von Produkten, Forschungsstelle für Europäisches Umweltrecht (FEU), Bremen, UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT Forschungskennzahl 363 01 348 UBA-FB 001614

Schluep, M. et al. (2009): Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies RECYCLING FROM E-WASTE TO RESOURCES. July 2009. http://www.unep.org/PDF/PressReleases/E-Waste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf, letzter Zugriff 07.04.2016

Schmelzmetall (2014): http://www.schmelzmetall.com, letzter Zugriff 08.08.2015

Schmidt M., (2013): Rohstoffrisikobewertung – Antimon - DERA Rohstoffinformationen 18, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2013

Schöps, D., Salhofer, S., Spitzbart, M., Hagelüken, C., Meskers, C.E.M., Kriegl, M., Panowitz, G., (2010): Bilanzierung der Edelmetallverluste beim E-Schrottrecycling. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Band 3. Neuruppin: TK-Verlag, S. 641–645.

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., Merz, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Darmstadt.

Schüller, A.M. (2012): Touchpoints, 3., aktualisierte Auflage 2013, ISBN 978-3-86936-330-1

Sczech (2013): Pers Comm, 27.03.2013 (Referatsleiter Betriebswirtschaft, Fortbildung und Statistik beim Bundesverband Deutscher Leasingunternehmen e.V., per Mail)

Shaw, P. J., & Maynard, S. J. (2008). The potential of financial incentives to enhance householders' kerbside recycling behaviour. Waste management,28(10), 1732-1741.

Sidique, S. F. (2008). Analyses of Recycling Behavior, Recycling Demand, and Effectiveness of Policies Promoting Recycling. ProQuest.

Siegmann J. (2013): Finanzielle Anreize und Pfand bei Sammelsystemen für Mobiltelefone. Eine experimentelle Willingness-To-Accept Studie, Bachelorarbeit an der Leuphana Universität Lüneburg im Major Wirtschaftspsychologie, Lüneburg, 2013

Siemens (2012): Die Rohstoff-Detektive. Online verfügbar unter http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-fall-2011/_html_de/knappe-rohstoffe.html, letzter Zugriff 4.6.2012.

Sinus (2013): Sinus Milieu Studie,Heidelberg 2013,

Solvay (2013): Firmendarstellung, http://www.youtube.com/watch?v=IkmKiQGh_Zs&feature=youtu.be, letzter Zugriff 07.02.2013

Spectaris (2011): Compound Semiconductor Industry Innovation Meets REACH, http://www.spectaris.de/uploads/tx_ewsartikel/CLP_Galliumarsenid_Presentation.pdf, letzter Zugriff 02.03.2015

Speirs, D., & Tucker, P. (2001). A profile of recyclers making special trips to recycle. Journal of Environmental Management, 62(2), 201-220.

Spengler, L. (2013) per.com., Gespräch mit Laura Spengler, Ökopol, 18.04.2013

Statista (2013a): Entwicklung der Absatzzahlen des Nintendo DS in Deutschland von 2005 bis 2012, : http://de.statista.com/statistik/daten/studie/74291/umfrage/verkaufszahlen-des-nintendo-ds-in-deutschland-seit-2005/, letzter Zugriff 17.04.2013

Statista (2013b): Entwicklung der Absatzzahlen der Playstation Portable in Deutschland von 2005 bis 2012, : http://de.statista.com/statistik/daten/studie/74191/umfrage/verkaufszahlen-der-playstation-portable-in-deutschland-seit-2005/, letzter Zugriff 17.04.2013

Statista (2013c): Absatz von ausgewählten Spielkonsolen weltweit von 2008 bis 2012, http://de.statista.com/statistik/daten/studie/214670/umfrage/absatz-von-ausgewaehlten-spielkonsolen-weltweit-seit-2008/, letzter Zugriff 17.04.2013

Statistisches Bundesamt (2011): Finanzierung gesucht: Der Zugang kleiner und mittlerer Unternehmen zu Finanzmitteln, https://www.destatis.de/DE/Publikationen/STATmagazin/UnternehmenGewerbeInsolvenzen/2011_07/2011_07KMU.html, 13.07.2011 (drei Viertel der KMUs nutzen Leasing)

Stelter, M. (2013): Vortrag „Recycling von Gallium aus Prozessrückständen“ auf der Recycling- und Rohstoffkonferenz vom 04.03-05.03.2013 in Berlin

stiftung elektro-altgeräte register (ear) (2012): Kennzahlen: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen, Sammelgruppe 3; Sammelgruppe 5, je 1.1.2012. http://www.stiftung-ear.de/service_und_aktuelles/kennzahlen/zusammensetzung_gemischter_sammelgruppen

STMUG (2012): „Machen Sie den Reservehandy-Check“, Althandysammlung in Bayern 2012, Ergebnisreport Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, Althandysammlung, München, 2012

Stobbe, L., (2007): EuP Preparatory Studies “Televisions” (Lot 5) Final Report on Task 2 “Economic and Market Analysis”; Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration, IZM, Berlin Department Environmental Engineering, Brüssel, 2007

Streicher-Porte, M. (2014): Ab ins Recycling – Aber wann? Erhebung der Umlaufdauer bei elektronischen Geräten, in: SENS, SWICO, SLRs: Fachbericht 2014, Zürich, 2014, www.slrs.ch/download.php?cat=3EwKyuta1vc%3D&id=91, letzter Zugriff: 25.05.2015

SWICO (2015): Fachbericht 2015, http://www.swico.ch, letzter Zugriff 02.04.2016

Szyszkowitz , C. (2015): C. Szyszkowitz, Deutsche Telekom Technik GmbH, pers.com. letzter Zugriff Februar 2015

T3n (2013): Nintendo in Zahlen, http://t3n.de/news/hat-nintendo-videospiele-welt-433812/, letzter Zugriff 17.04.2013

take-e-way (2012): Abschlussbericht – Verbrauchernahe Sammlung von Haushaltskleingeräten und Energiesparlampen im Rahmen der Umwelthauptstadt Europas 2011. Hamburg.

Tanskanen, Pia (2012): Electronics Waste: Recycling of Mobile Phones. In: Post-Consumer Waste Recycling and Optimal Production. Damanhuri, Enri (Editor).

TDW (2013): Typologie der Wünsche, Hurbert Burda Media, München 2013) , www.tdw.de, letzter Zugriff: 18.11.2014

Teck (2012): The E-waste Process Fact Sheet. http://www.teck.com/Generic.aspx?PAGE=Teck+Site%2fResponsibility+Pages%2fRecycling+Pages%2fE-waste+Fact+Sheet&portalName=tc, letzter Zugriff 25.05.2012

TiDis (2013): Druckerwartungsservice, http://www.tidis.de/druckerwartungsservice/index.php, letzter Zugriff 26.03.2013

TNS Infratest (2008), Terapeak: Facts and Figures Neue eBay-Studie zu Deutschlands Dachbodenschätzen

Treibacher (2012): Metalle, http://www.treibacher.com/de/produkte/metalle.html, letzter Zugriff 13.08.2012

Tropag (2014): Frimendarstellung, http://www.tropag.de, letzter Zugriff 05.08.2015

UBA (2014): www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2312, letzter Zugriff: 18.11.2014

UBA GmbH (2004): Umweltbundesamt GmbH, Medienübergreifende Umweltkontrolle in ausgewählten Gebieten, Wien, 2004, ISBN 3-85457-757-5, S. 527

Umicore (2013): Firmendarstellung, http://www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/process/, letzter Zugriff 07.02.2013

UNEP (2009): SteP- Solving the e-waste problem, Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies RECYCLING -FROM E-WASTE TO RESOURCES July 2009

UNEP (2011): Recycling Rates of Metals- A Status report. A Report of the Working Group on global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C.

UNEP (2013): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Autoren: Reuter, Markus A.; Hudson, Christian; van Schaik, Antoinette; Heiskanen, Kari; Meskers, Christina E. M.; Hagelüken, Christian.

Uni Erlangen (2012): Dauermagneten im Stoffkreislauf. Motor Recycling-Projekt MORE beugt Versorgungsengpässen vor. forschung Nr. 1/2012 vom 10.1.2012
http://www.uni-erlangen.de/infocenter/meldungen/forschung/2012/1/10/95.shtml letzter Zugriff: 14.05.2015

United Nations Environmental Programme (UNEP) (2007). E-waste Volume 1 Inventory Assessment Manuel. UNEP Division of Technology, Industry, and Economics, Japan

United Nations University (UNU) (2007). 2008 Review of Directive 2002/96 Waste Electronic And Electrical Equipment (WEEE) Final Report. UNU Campus Bonn, Germany Contract No: 07010401/2006/442493/ETU/G4. ENV.G.4/ETU/2006/0032. 05 August 2007. http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf, letzter Zugriff: 14.05.2015

UnitedSenses (2011) „love green“, Erste deutschlandweite Medieninitiative zum Thema Nachhaltigkeit, UnitedSenses GmbH, 2011 www.love-green.de, letzter Zugriff 18.11.2014

USGS (2008): Material Use in the United States—Selected Case Studies for Cadmium, Cobalt, Lithium, and Nickel in Rechargeable Batteries. Scientific Investigations Report 2008–5141, Reston

USGS (2011): Rare Earth Elements – End Use and Recyclability. Scientific Investigations Report 2011 – 5094, Reston

USGS (2012): U.S. Geological Survey: 2010 Minerals Yearbook. Advance Release. Online verfügbar unter: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/, letzter Zugriff 4.6.2012

Vacuumschmelze (2012): Vakuuminduktionsschmelze., http://www.vacuumschmelze.de/index.php?id=40&L=-2, letzter Zugriff 03.08.2012

van Schaik, A., Reuter, M.A., NVMP/Wecycle (2013): Product Centric Simulation Based Design for Recycling (DfR). Online verfügbar unter http://www.nvmp.nl/uploads/pdf/nieuws/2013/2013 %2010 %2011 %20Summary%20MARAS%20def3.pdf, letzter Zugriff 11.05.2015.

VD Media (2013): Beamer Wartung, http://www.vd-media.de/wartung.html, letzter Zugriff 5.04.2013

VDI (2013): PC-Markt stürzt ab -Geräte werden länger genutzt, vdi-Nachrichten 19. April 2013, Nr. 16, Seite 1

Verbraucherschutzzentrale Nordrhein-Westfalen (VZ NRW) (2012): Datensicherheit bei Elektroaltgeräten. Online verfügbar unter: http://www.vz-nrw.de/UNIQ135019458111543/datensicherheit-bei-elektroaltgeraeten, letzter Zugriff 14.10.2012.

verfahrensingenieur.de (2012): Extraktion, Extraktionsverfahren, http://www.verfahrensingenieur.de/Extraktion.html Juli 2012, letzter Zugriff 21.09.2014

Vilbel (2013): Pressemeldung des Landes Hessen vom 10. Januar 2013 unter http://www.pressemeldung-hessen.de, letzter Zugriff 20.10.2014

Vining, J., & Ebreo, A. (1990). What makes a recycler? A comparison of recyclers and nonrecyclers. Environment and behavior, 22(1), 55-73.

VTRON (2015): VTRON News, http://www.vtron.de/VTRON_News_0511.pdf, letzter Zugriff 18.08.2014

Walter, P. (2011): Rhodia recovers rare earths, http://www.soci.org/Chemistry-and-Industry/CnI-Data/2011/3/Rhodia-recovers-rare-earths, letzter Zugriff 12.08.2012

Wang, F., Huisman, J., Stevels, A., Balde, C.P. (2013): Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input-Output-Analysis, in: Waste Management 33 (2013, 2397-2407

Wayback Machine (2013): LED-Lampe, http://web.archive.org/liveweb/http://www.amazon.de/led-lampe-Baumarkt/s?ie=UTF8&field-brand=&field-price=&page=1&rh=n%3A80084031 %2Ck%3Aled%20lampe, letzter Zugriff 17.04.2013

Wecycle (2012): Firmendarstellung, http://www.wecycle.eu/ letzter Zugriff 17.04.2013

Wesel (2013): Lokalnachrichten vom 09.04.2013 unter http://www.radiokw.de/, letzter Zugriff: 15.5.2015

WGI (2012): Worldwide Governance Index, http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp, letzter Zugriff 02.10.2013

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Deepali, S.-K., Schnellmann, M., Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. Environmental Impact Assessment Review, Volume 25, Issue 5, July 2005, Pages 436-458

Wien (2011): „Helle Birnen entsorgen richtig“, Wien 2011, www.abfall.wien.at, letzter Zugriff: 18.11.2014

Wikipedia (2012): Akustische Oberflächenwelle, http://de.wikipedia.org/wiki/Akustische_Oberfl%C3 %A4chenwelle, letzter Zugriff 01.11.2012

Wilker, H. (2010). Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Komponenten: Mit 86 Tabellen, 86 Beispielen (2nd ed.). Norderstedt: Books on Demand.

Winterberg (2013): Winterberg, S.: Erfassungssysteme –Vergleichende Analyse und Bewertung, Vortrag Hamburg T.R.E.N.D 2013

Witzenhausen (2013): Abfallkalender der Stadt Witzenhausen zur Abfallentsorgung unter http://www.witzenhausen.eu/

Woidasky, J., Stolzenberg, A., Barner, L., Dräger, R., Gromer, G., Henze, T., Lauinger, S., Schemel, J. (2010): Hochwertige technische Polymercompounds aus E/E-Altgeräten – Abschlußbericht, Pfinztal, 2010

WRAP (2009): Compositional Analysis of Kerbside Collected Small WEEE, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjVk-

vj243fAhWSUlAKHax5BAwQFjAAegQIC-RAC&url=http%3A%2F%2Fwww.wrap.org.uk%2Fsites%2Ffiles%2Fwrap%2FAxion_WEEE_Composition_Report_-_FINAL_260209.3ff6dd40.6642.pdf&usg=AOvVaw1HtbH0_CxZWXjWvlAur74t, letzter Zugriff 12.11.2017

Wrap (2011): Final report into study of market flows of WEEE materials, including development of a mass balance model, http://www2.wrap.org.uk/downloads/Market_flows_of_WEEE_materials.7f624ba5.11533.pdf, letzter Zugriff 23.04.2013

WRAP (2012): Strategic Raw Materials, Recovery Capacity and Technologies - A study into the capacity and technologies for treatment and recovery of strategic raw materials in the UK and abroad, the barriers to increasing this capacity and the actions that could be taken to overcome these barriers, IMT002-001 Final Report 26.03.2012

WZ (2013): Pressemeldung vom 25. Januar 2013 - 06:36 Uhr unter http://www.wz-newsline.de/lokales/wuppertal, letzter Zugriff 25.1.2013

Xstrata (2012): The smelting process. http://www.norandarecycling.com/img/com_flowsheet_smelting_horne.gif, letzter Zugriff 19.03.2012

Xu, W. (2013): Processing and Utilization of Rare Earth Solid Wastes, Baotou Research Institute of Rare Earths, Presentationat the conference “Critical Metals: Recycling & Recovery – A WayForward” March 18-19, 2013, London

ZVEI (2003): Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors. 2003a. http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Umbrella_Specs/Passive_Components/Ceramic_Capacitors/USpecs_MLCC_DR_Ver02.pdf, letzter Zugriff: 06. Oktober 2008

ZVEI (2010):Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarkts 2010

ZVEI (2011): Zahlenspiegel des deutschen Elektro-Hausgerätemarkts 2011

ZVEI (2012): Der Markt für Consumer Electronics in Deutschland 2011. Eine Studie von GFK und gfu, Frankfurt.

10 Anhänge

10.1 Anhänge zum Kapitel Lokalisierung, Quantifizierung

10.1.1 Metall-Komponenten-Matrix auf Basis der Literaturrecherche

Abbildung 180: Gesamtübersicht der produktbezogenen Quantifizierungen

Bauteile	Cobalt	Gallium	Gold	Indium	Palladium	Seltene Erden	Silber	Tantal	Zinn
Lote			x[7]	x[2]	x[2,7]		x[7]		x[1,2]
Halbleiter		x[1,2,4,5]		x[1,2,3]					
Transparente Elektroden (→Indiumzinnoxid ITO)				x[1,2,3,4,5,6]					
Magnete	x[3,5]					x[1(Gd),3,4 (Nd),5]			
Batterien	x[1,3,4,5,6]			x[2]		x[1(La, Nd),3,4,5]	x[2,3]		
Leuchtstoff						x[1,4]			
Keramikadditiv	x[3]					x[1,3]			
Glasadditiv	x[3]					x[1(Er),3]			x[2]
Integrierte Schaltkreise		x[1,2,3,4,5]	x[7]						
Hybridschaltkreis			x[7]						
Diode			x[7]		x[7]				
Leuchtdiode (LED)		x[2,3, 4,5]		x[2,3]					
Laserdiode		x[2,3,4,5]		x[2,3]					
Sensorik		x[2]			x[2]				
Photodetektor		x[2,3,5]		x[2,3]					
CRT (Kathodenstrahlröhrentechnik)			x[2]						
LCD (Flüssigkristallanzeige)			x[2]	x[2,3,4,5,6]					
PDP (Plasmabildschirm)							x[2,3]		
Kondensator				x[2]		x[3]		x[3,4,5,6]	
Thermistortechnik				x[2]					
Transistor			x[7]	x[2]					
Kontaktwerkstoffe (Schalter, Relais, Steckkontakte, Sicherung etc.)			x[7]		x[2,7]		x[2,3,7]		
Keramikvielschicht-Chipkondensator (MLCC)					x[2,4,5,7]		x[2]		
Leiterplatte			x[7]				x[2,7]		
Membranschalter							x[2]		
Festplatten (Beschichtung)							x[2]		
Hartmetall	x[3]							x[4]	
Grundplatte							x[7]		
Gehäuserahmen							x[7]		

1	IZT 2011
2	Wittmer. D., et al. 2011
3	European Commission 2010
4	Oakdene Hollins, Final Report 2011
5	Oakdene Hollins, Annexes 2011
6	Buchert, M., et al. 2009
7	Chancerel, P. 2010

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 181: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (1/3)

	Produktgewicht					Cobalt					Gallium		Gold			
							NiCd	NiMH	Li-ion	Li-polymer						
	[g]					[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]		[mg]			
1. PC	15000	12154				67,68					15,51		338,4	316,004		
2.1 mit CCFL	250					65000							100			
2.2 mit LED	250					65000					1,6		100			
3. Handy	110	197	80, 42, 48, 42	197		9,3324	720	924	8448	6678	4,6662		49,995	59,297 – 68,359		
4. Smartphone	110					6300							30			
5. tragbare Videospiele	165	165	165			19,8					1,65		12,705	5,001975	5,0126175	
6. Videospielkonsolen	1547	1547				154,7					30,94		355,81	30,3212		
7. Camcorder/ Videokamera (digital)	600	800	160	800		19,116	156,8	1400		7300	5,5224	2,4	56,286	6,4	117,368	
8. MP3 Player	50	50				5 – 10					10		45 – 55	7,5		
9. Digitalkamera	240	144	144		144	6,7872	21,3 – 49,392		300	2400	0,7272	1,872 – 4,32	155,136	24,912 – 54,144	18,6408	18,6408
10. USB Stick	13	13				19,5							192,4	2,366		
11. Tablet Computer																
12. Energiesparlampen																
13. LED Lampen											0,033	0,241254	2,5			
14. Leuchtstoffröhren/ Gasentladungslampen	144												0,025			
15. Multifunktionsdrucker mit Scanner und Laserdrucker	5600	4340	4340			16,1616					1,2432		15,7472	13,2587	14,105	
16. Bohrmaschine, batteriegetrieben	2470	43					300						0,1482			
17. DVD Spieler	3200	3140	3140	3140		49,28					4,032		67,2	628	47,1 – 78,5	46,472
18. CD Spieler (portabel)	170	21				1,3736	0 - 100						6,3529			
19. Externe Festplatten	575												5 – 5,1			
20. Lautsprecher	11000	1635				3,663							7,326	4,1202		
21. Wecker, batteriegetrieben	71	21					0 - 100						0,01917			
22. Kopfhörer	100															
23. CRT																
23.1 Monitor	10000	10000	14653			180							13	10	8,5	
23.2 Fernseher	31000	14512	14512	26671		210	97,092						170	13,485	95089 – 75,02	6,82064
24. LCD Fernseher	7900	8600	8600										183,28	47,472	47,472	
24.1 mit CCFL	1800												140			
24.2 mit LED	1800										4,9		140			
24.3 mit Hg	28300												110			
25. LCD Monitor	3337	3337											28,321119 – 112,82397		28,321119	
25.1 mit CCFL	300												200			
25.2 mit LED	300										3,3		200			
25.3 mit Hg	5082												200			
26. Kaffeemaschine	1000												0,09			
27. Navigationsgerät	300	300	300			30							30	48,24	48,24	
28. Fernbedienung	92	92				0,92 – 10,58					0,092 – 1,196		1,012 – 6,624	0,414		
29. Schnurloses Heimtelefon	226	226	80	226		22,6	700				4,294		13,786	27,12	3,78098	
30. Rasierapparat	312	21					0 - 100						0,20592			
31. Taschenrechner	79	79				10,823 – 39,658					0,158 – 1,264		1,027 – 7,505	3,95		
32. Beamer	2000												20			

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 182: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (2/3)

	Indium	Palladium				Seltene Erden		Silber			Tantal	Zinn	
						Alle	Neodym						
	[mg]	[mg]				[mg]	[mg]	[mg]			[mg]	[mg]	
1. PC		211,5		145,848			6830	803,7	2126,95		9,87	25380	
2. Laptop		79,46		49,2625					437,03		2304,34	6356,8	
2.1 mit CCFL	40			40		2432,17	2100		440		1700		
2.2 mit LED	40			40		2432,48	2100		440		1700		
3. Handy		9,999		26,201 – 36,642			118,2 46	126,654	336,476 – 715,11		86,658	1166,55	
4. Smartphone				11		60	50		305				
5. tragbare Videospiele	8,085	0,825	1,5609		1,5609		42,3	75,9	21,604275		< 0,165	12210	
6. Videospielkonsolen		66,521		6,06424			1237,6		1051,96		26,299	66521	
7. Camcorder/ Videokamera (digital)	4	103,014	1,6		5,712		20,8	531	34,4		849,6 60	4035,6	709,6
8. MP3 Player	10 – 15	5		1,5					140 – 215		5 – 150	825 – 1500	
9. Digitalkamera	1,44 – 4,608	9,696	3,888 – 21,024	0,9072	0,9072		16,56 – 169,92	155,136	8,592 – 204,4	66,0312	382,992 0,576 – 92,592	1890,72	571,68 – 1382,4
10. USB Stick		0,078					10,4	35,1	12,441			71,5	
11. Tablet Computer													
12. Energiesparlampen													
13. LED Lampen	0,029					0,0497		10,11				300	
14. Leuchtstoffröhren/ Gasentladungslampen		0,015						0,27				110	
15. Multifunktionsdrucker mit Scanner und Laserdrucker		8,7024	2,5389		2,5389			29,008	98,735			6630,4	
16. Bohrmaschine, batteriegetrieben		0,03952											
17. DVD Spieler		8,96	12,56 – 15,7		9,75912		314	318,08	5024	342,26 – 533,8	34,496	9856	63114
18. CD Spieler (portabel)		0,1717					950		63,529		11,5039	858,5	
19. Externe Festplatten		3 – 3,1				1249	11500 1044		31 – 31,1				
20. Lautsprecher		1,09872					5200		69,597			26862	
21. Wecker, batteriegetrieben		0,005112											
22. Kopfhörer							1370						
23. CRT													
23.1 Monitor		4,8		5				210	110			810	
23.2 Fernseher		67	53,94	6,82064 – 27,964624	2,3190176			2650	323,64	97792 – 1091,3024		13000	48546
24. LCD Fernseher		0	15,0328		15,0328			549,84	197,8			26575,6	
24.1 mit CCFL	260			44		132,33			580				
24.2 mit LED	260			44		7,49			580				
24.3 mit Hg				34					450			18300	
25. LCD Monitor		3,223542 – 22,795047			3,223542				299,3289				
25.1 mit CCFL	79			40		19,316			520				
25.2 mit LED	82			40		4,96			520				
25.3 mit Hg				41					520			530	
26. Kaffeemaschine		0,024											
27. Navigationsgerät	30	61,92			61,92			630	452,97			6750	
28. Fernbedienung	0,644 – 1,748	0,184 – 3,588			0,1104		0,184 – 7,544		3,588 – 54,464		0,092 – 6,532	242,88 – 502,32	
29. Schnurloses Heimtelefon	14,916	22,374	21,47		0,81021		167,24	293,8	305,1		0,452	4520	
30. Rasierapparat		0,054912											
31. Taschenrechner	0,474 – 1,264	0,158 – 2,923		0,395			0,079 – 11,613	2,054 – 37,525	20,54		1,58 – 8,532	247,27 – 541,94	
32. Beamer		4											

Quelle: eigene Darstellung

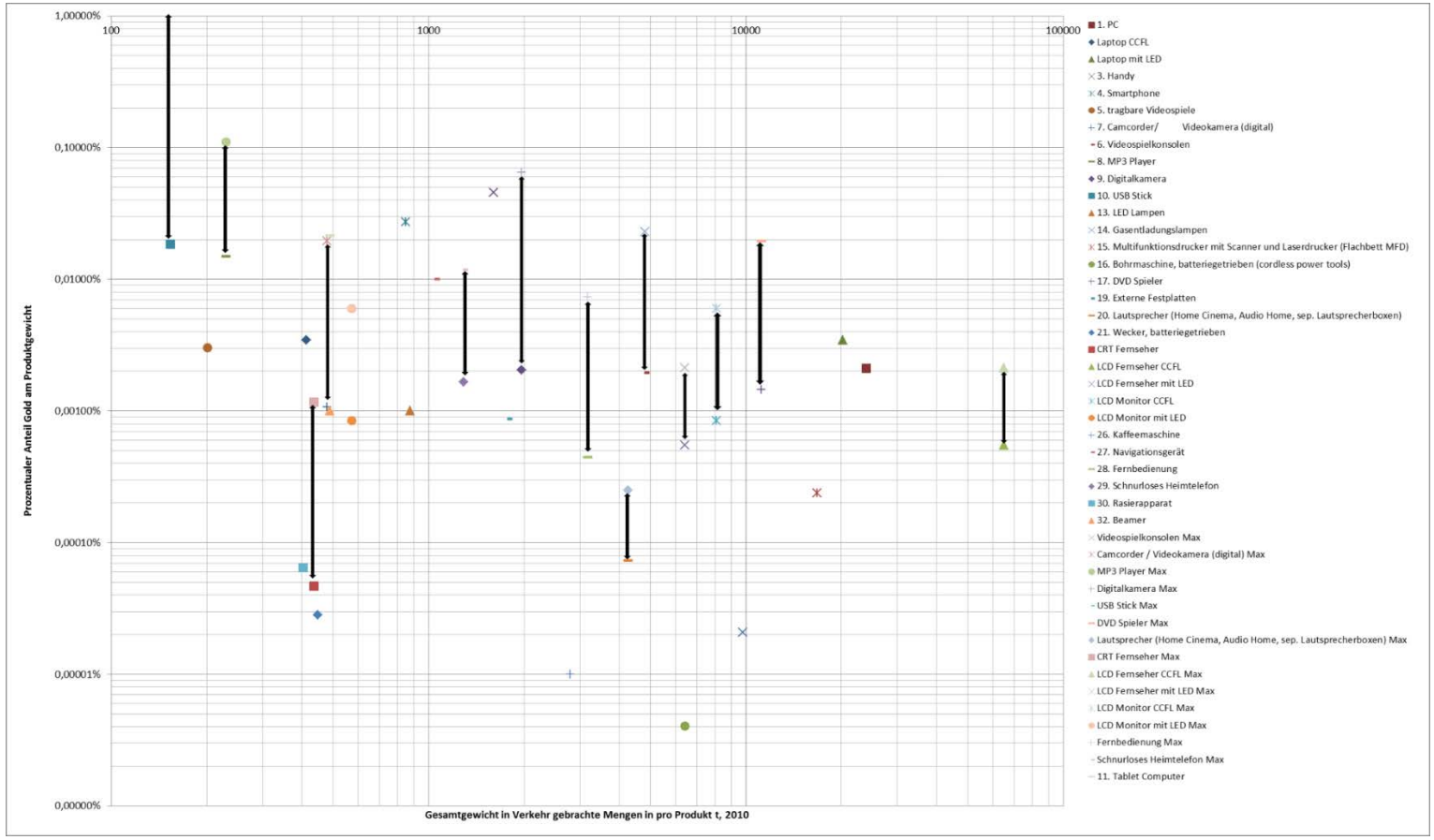
Abbildung 183: Quellen zur Quantifizierung der Mengen von RePro-Metallen in RePro Produkten (3/3)

	Buchert, M., et al.2012 (Produktgewichtsangaben bei Laptop, LCD-Monitor/-Fernseh entsprechen nur dem mittlerem Displaygewicht; Smartphonegewichtsangabe ohne Akku)
	Huisman, J., et al. 2007
	Oguchi 2011 (Metallmengenangaben für Leiterplatten), Oguchi 2007 (Produktgewicht)
	MoE and METI 2010 (Metallanteil im Produkt), Chancerel, P. 2010(Produktgewicht)
	Chancerel, P. 2010
	Chancerel, P. 2010 (Metallmengenangaben für Leiterplatten)
	Gschneidner, K. A. 2011 (Metallanteil im Produkt), Chancerel, P. 2010 (Produktgewicht)
	Gschneidner, K. A. 2011 (Metallanteil im Produkt), Mohite, S. 2005 (Produktgewicht)
	USGS 2008 (Metallmengen- und Gewichtsangaben für Batterien; die Reihung von Gewichtsangaben ist in der selben Reihenfolge wie die Batterieaufzählung unter Cobalt)
	Hobohm, J. 2012
	Chancerel, P. 2010 (Metallmengenangaben für Leiterplatten)
	Li, Yumbo 2012
	vgl. Pioneer SE-MJ3 Bügel-Kopfhörer

Quelle: eigene Darstellung

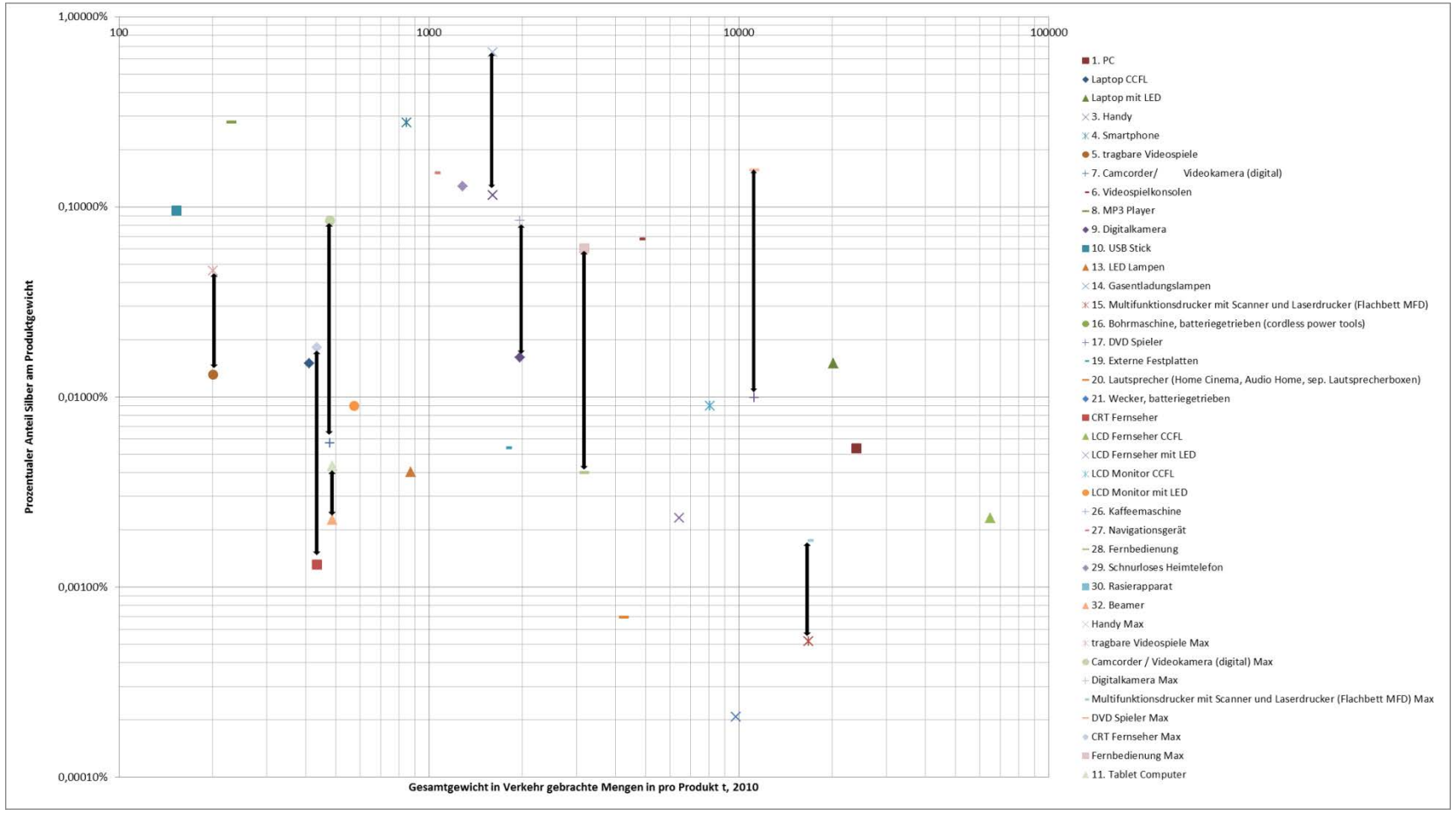
10.1.2 Mengen-Konzentrationen-Matrizes

Abbildung 184: Goldkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



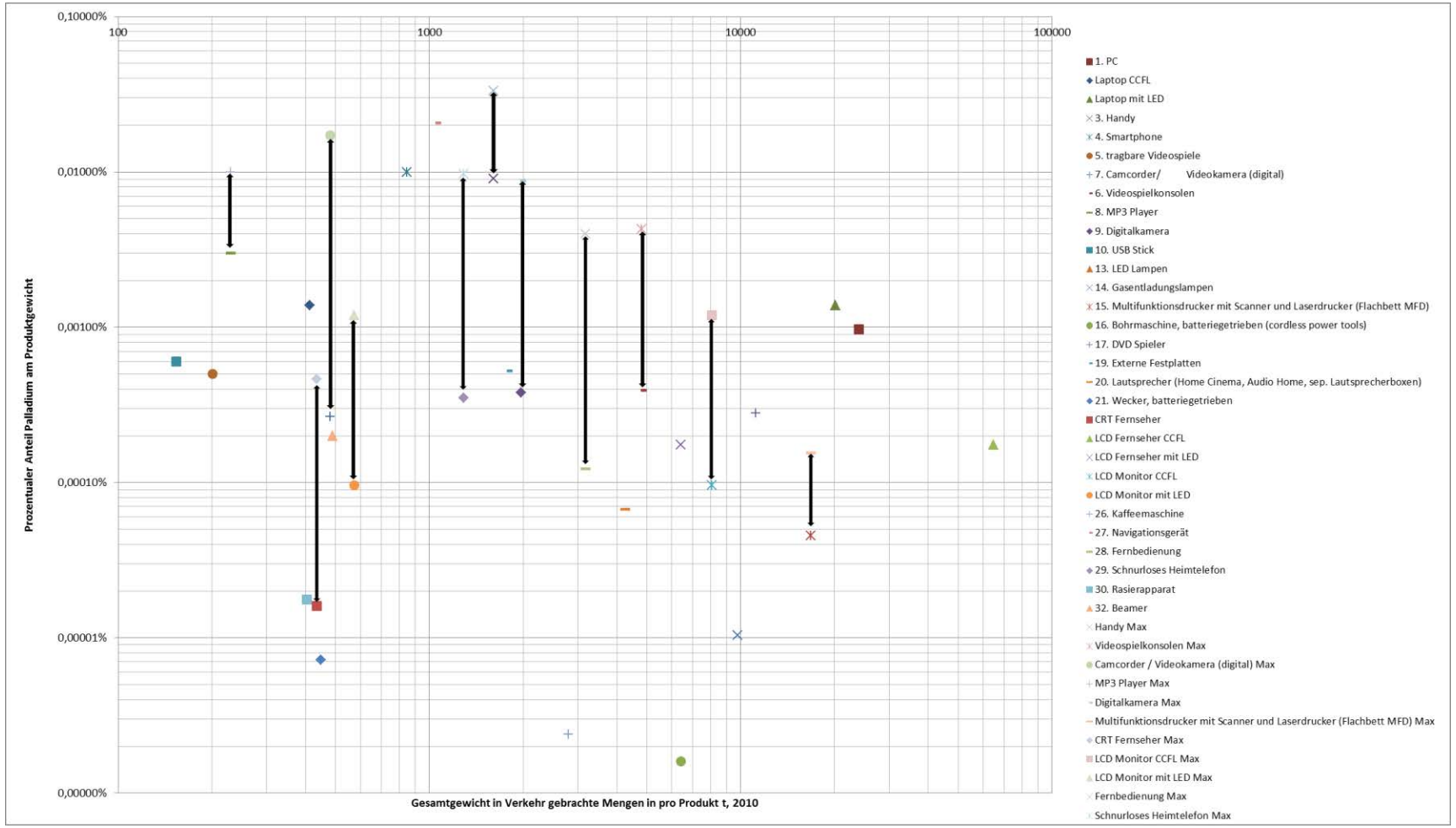
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 185: Silberkonzentration in den untersuchten Produkte, aufgetragen über dem Geräteabsatz



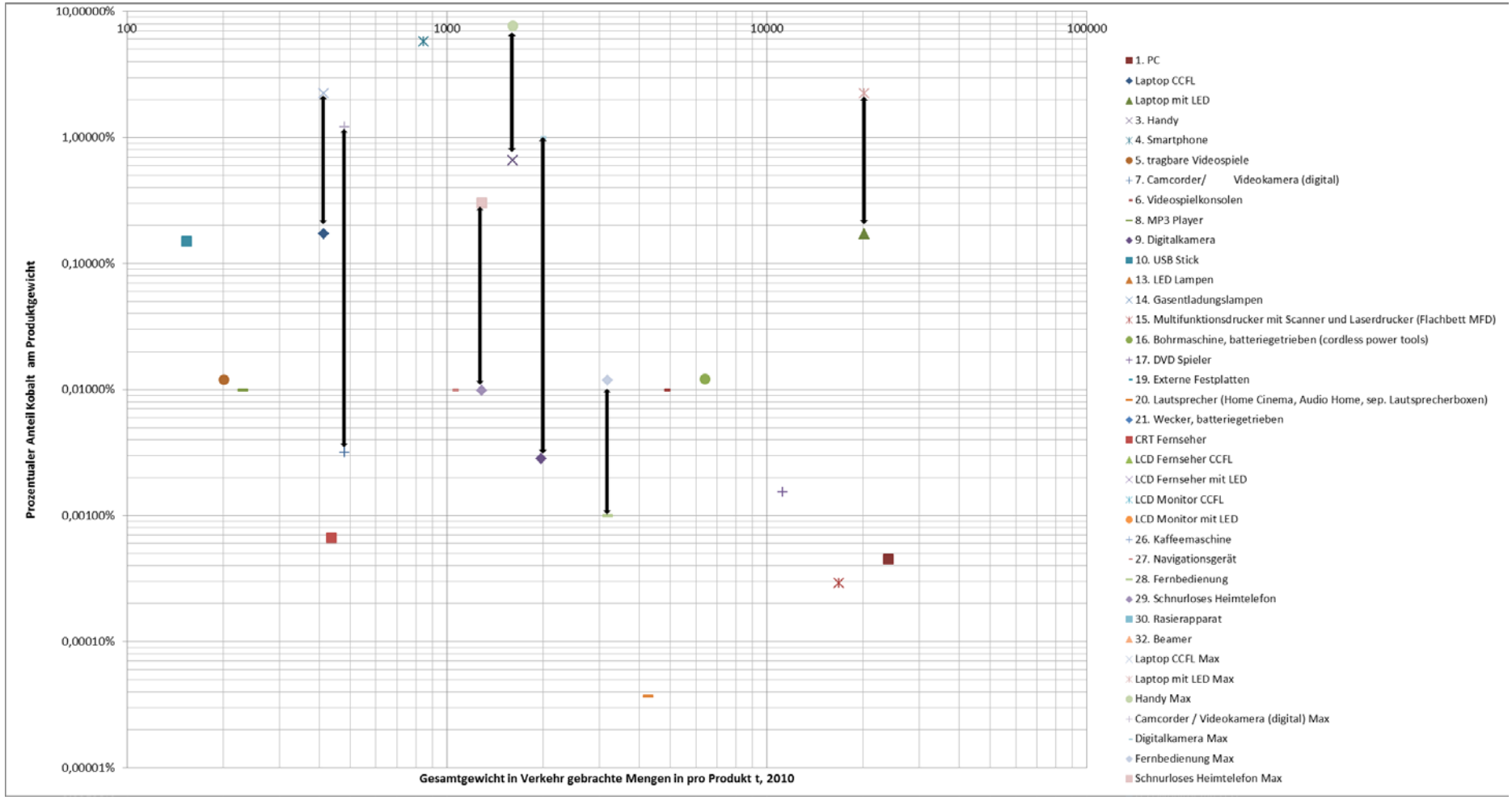
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 186: Palladiumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



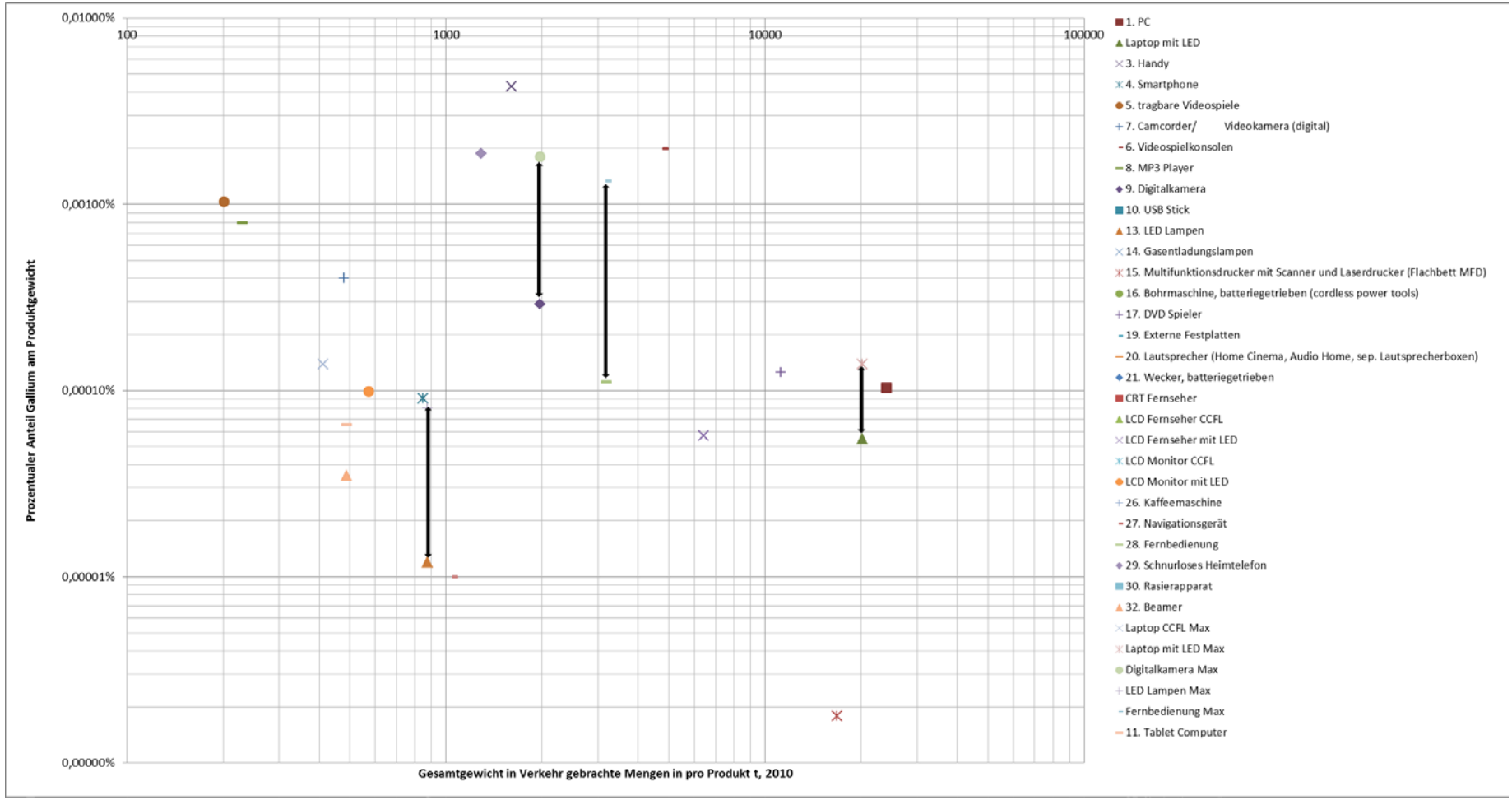
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 187: Kobaltkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



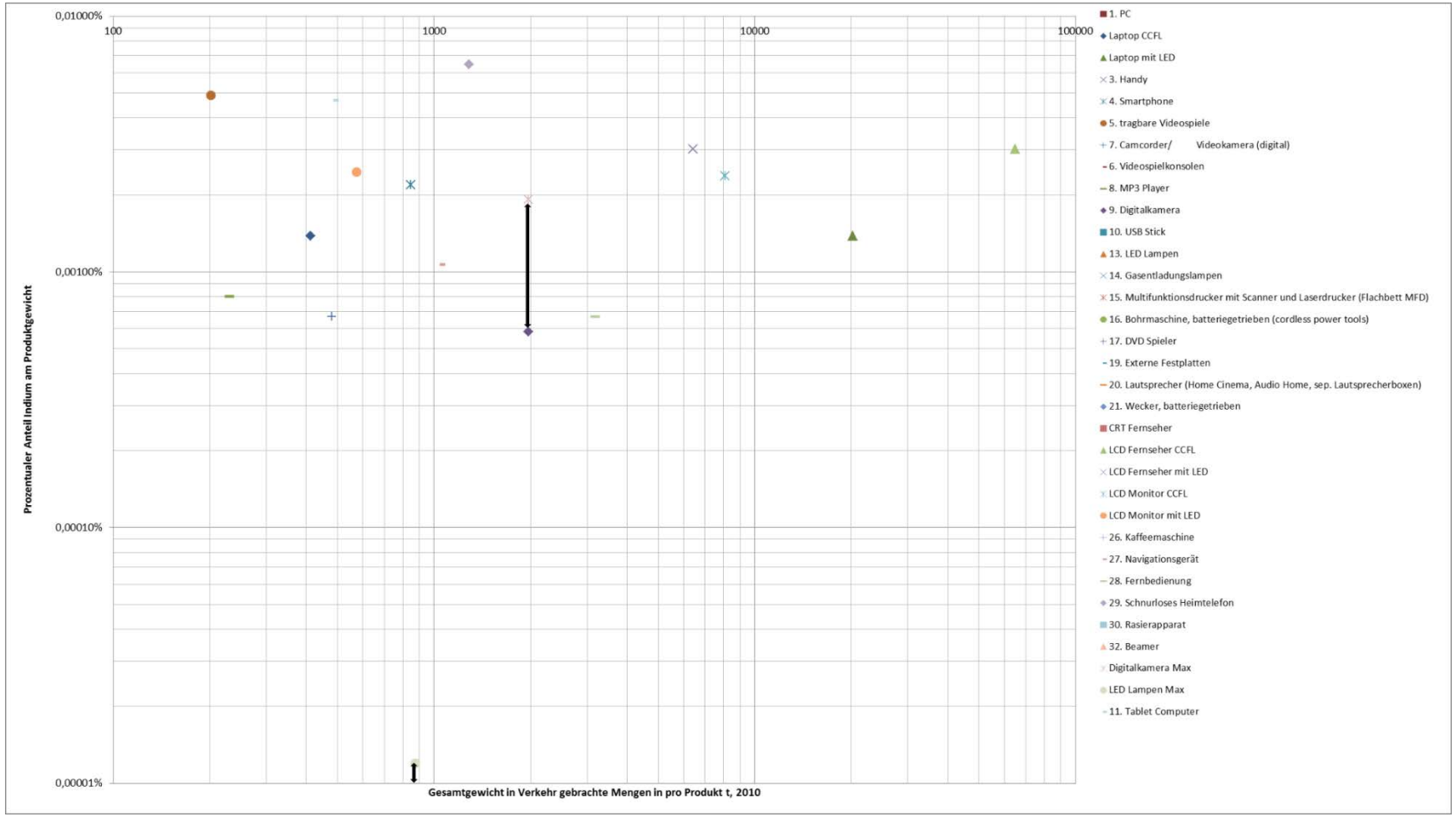
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 188: Galliumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



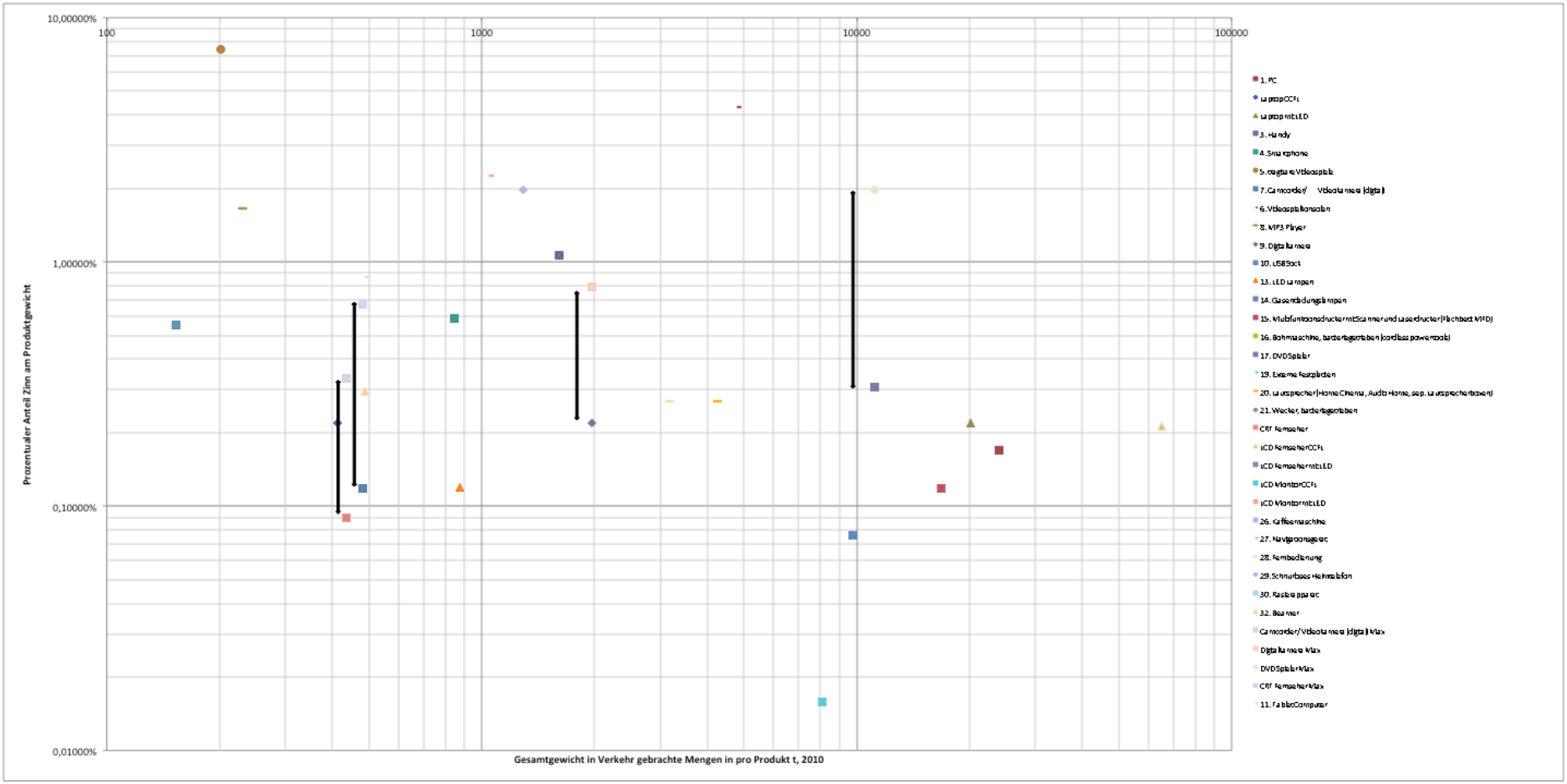
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 189: Indiumkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



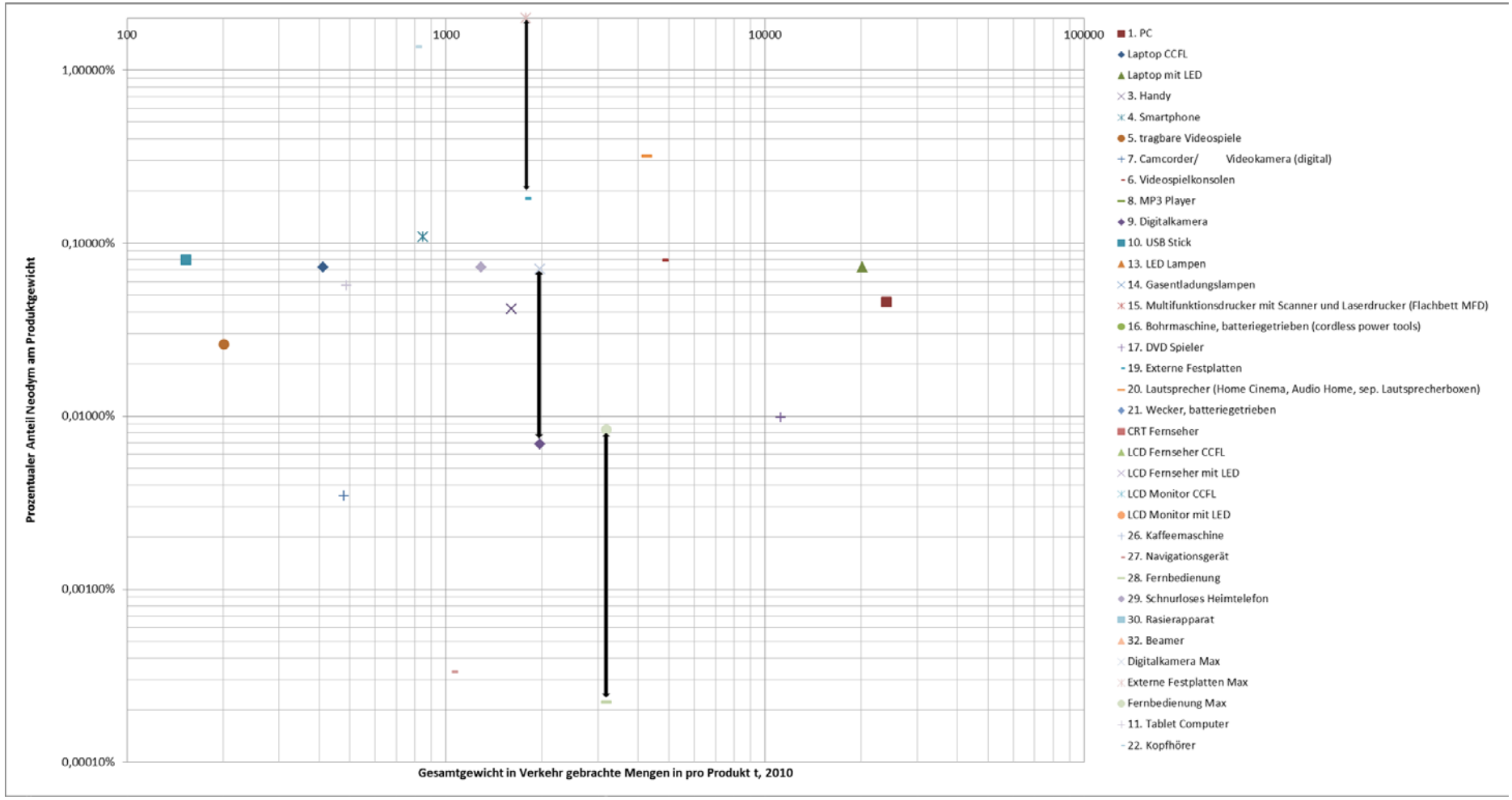
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 190: Zinnkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



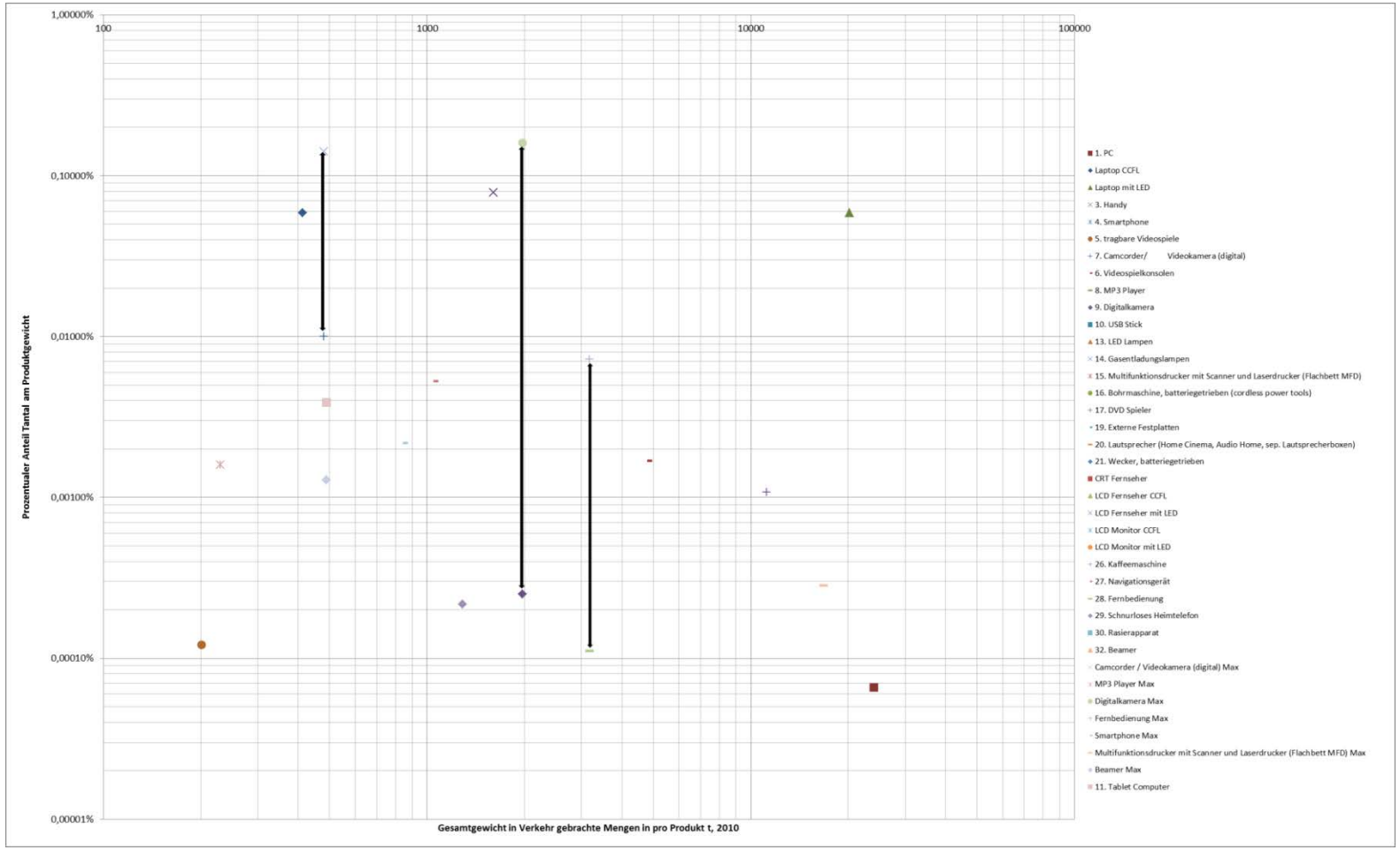
Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 191: Neodymkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz



Quelle: eigene Darstellung

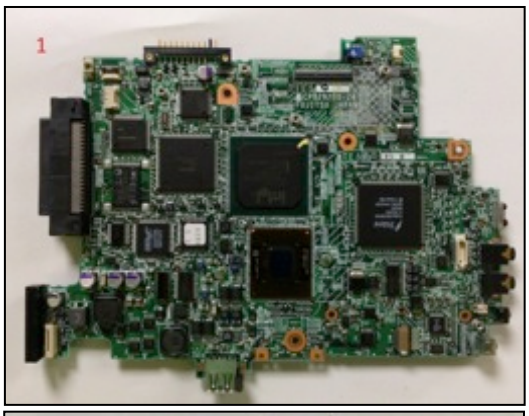
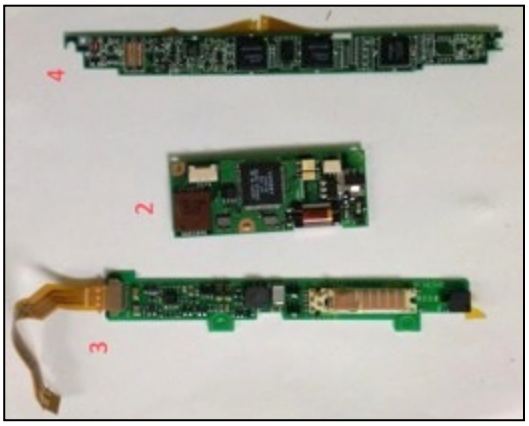
Abbildung 192: Tantalkonzentration in den untersuchten Produkten, aufgetragen über dem Geräteabsatz

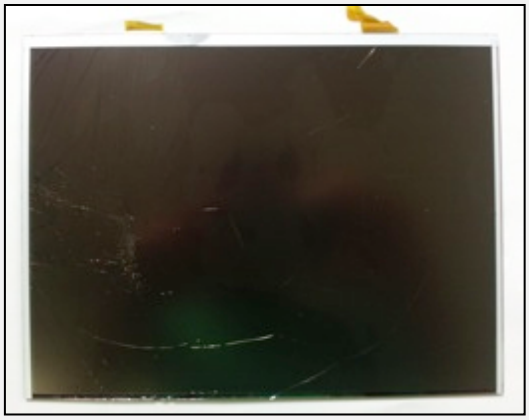
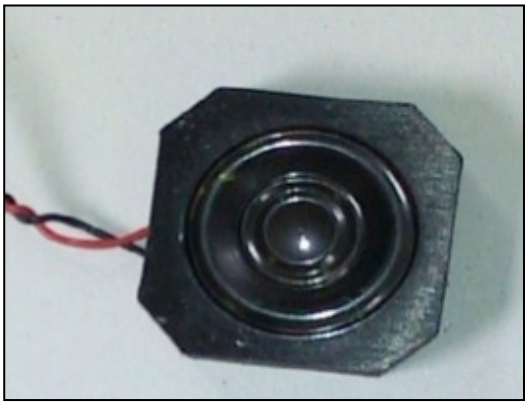
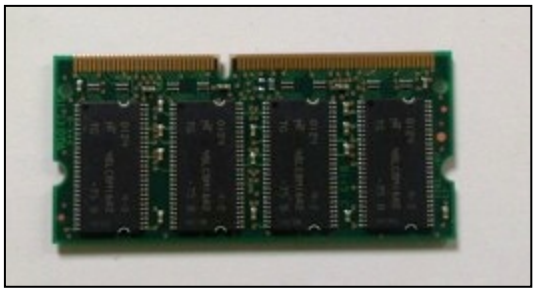


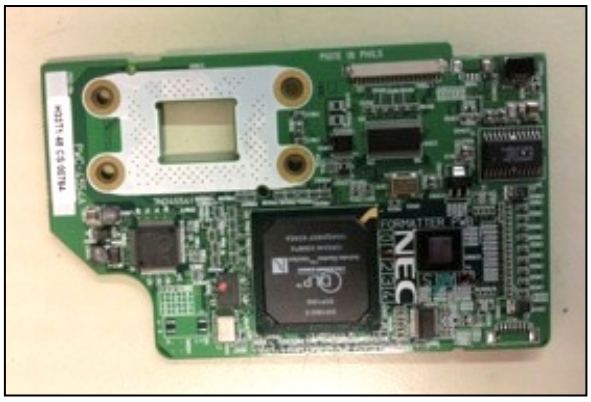
Quelle: eigene Darstellung

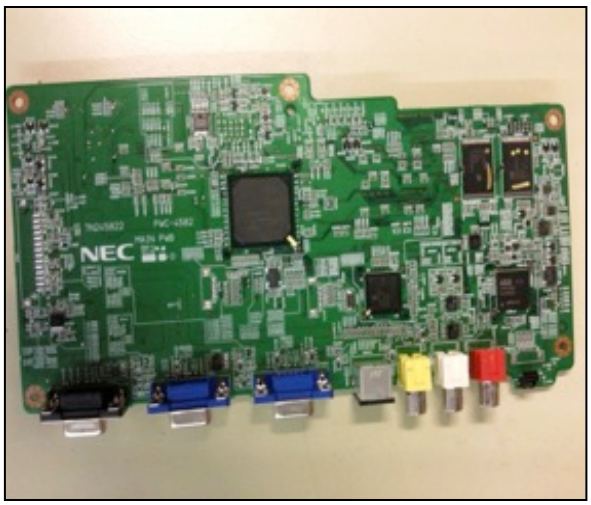
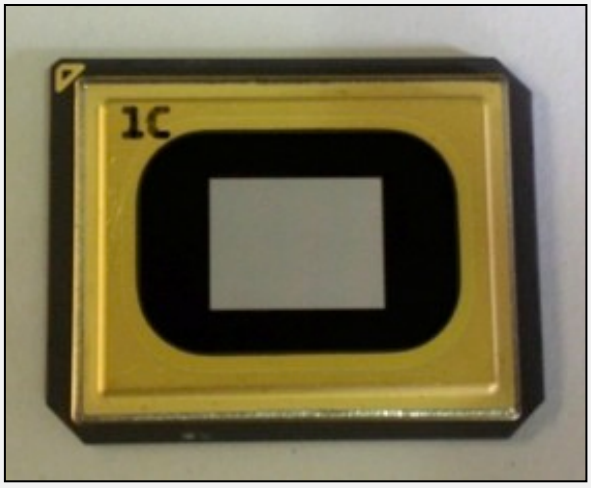
10.2 Anhang zum Kapitel Analytik zur Lokalisierung und Quantifizierung

Tabelle 120: Untersuchte Geräte (Quelle der Bilder: Ökopol GmbH)

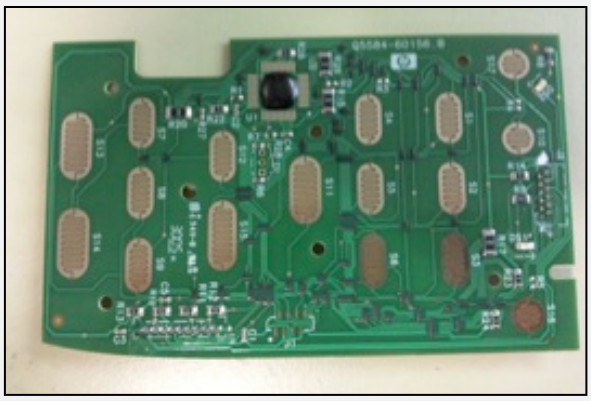
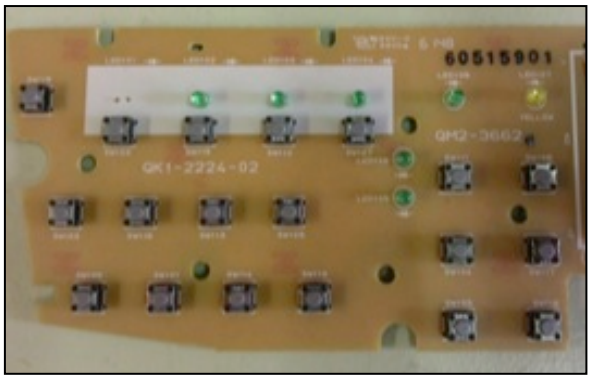
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
3.3 Tablet-Computer		Hersteller: Fujitsu Typ: STYLISTIC 3400 Gewicht: 910 g
Platinen	 	Platine1: Gewicht: 152,45 g Platine2: Gewicht: 9,87 g Platine3: Gewicht:7,29 g Platine4: Gewicht: 6,28 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
Display		Gewicht: 147,97 g
Lautsprecher		Gewicht: 4,17 g
Festplatte		Gewicht: 97,48 g Bauteilnummer: A4023080 1
Arbeitsspeicher		Gewicht: 9,62 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
3.6 Beamer		Hersteller: NEC Typ: Model LT240K Gewicht: 2640 g Herstellungsjahr: August 2004 Seriennummer: LT240GK S/N
Platinen		Platine 1 Gewicht: 62,42 g Bauteilnummer: H33T1 48 CS 00764
		Platine 2 Gewicht: 66,17 g Bauteilnummer: H33S1 48 CS 00674

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Platine 3 Gewicht: 127,57 g Bauteilnummer: H36F3 48 CS 00169
Mikrospiegelaktor		Gewicht: 22,84g Bauteilnummer: 4549560 100208
Lampe		Gewicht: 22,84 g Bauteilnummer: 12 JS 121 HE 3992 LT60 LPK 01161075 NSH 220NEA

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
3.7 Multifunktionsdrucker		Hersteller: HP Typ: HP PSC All-in-One 1600 Gewicht: 3780 g
		Hersteller: HP Typ: HP 1350 PSC 1300 Series Gewicht: 3280 g
		Hersteller: CANON Typ: MP 830 Gewicht: 4660 g
Platinen		Platine1 HP 1600 Gewicht: 135,71 g Bauteilnummer: Q5584-60321

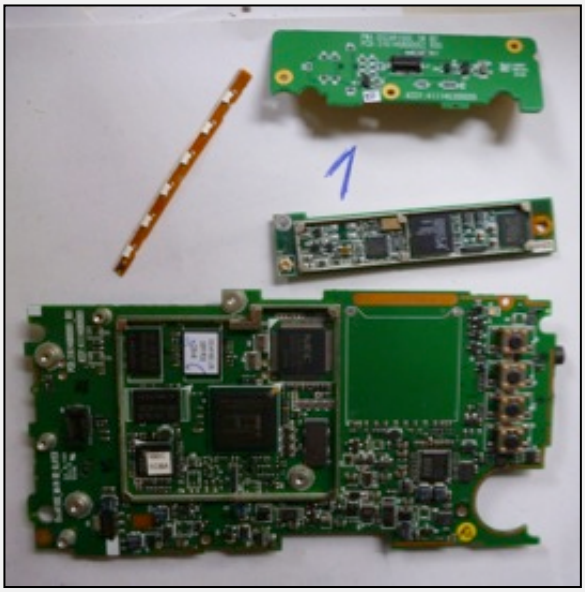
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Platine2 HP 1600 Gewicht: 23,27 g Bauteilnummer: Q5584-60156.B
Scan Einrichtung		HP 1600 Gewicht: 11,81 g Bauteilnummer: CA4B36 0522 REV:511
		HP 1350 Gewicht: 11,38 g Bauteilnummer: C26218-1R5H3 0408-1 REV:A4
LED		LED Canon MP 830 Gewicht: 0,4329 g Anzahl: 7

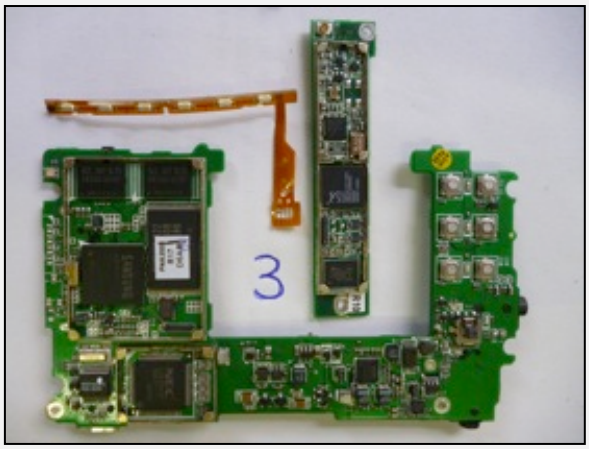
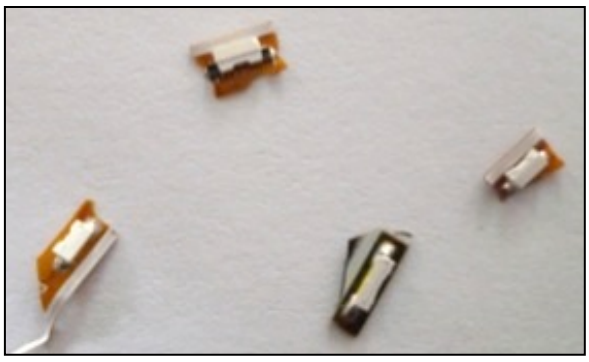
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
3.9 Navigationsgerät	Bild nicht verfügbar	Hersteller: MyGuide Typ: Navigator 4000 Gewicht: 217,45 g
	Bild nicht verfügbar	Hersteller: Medion Typ: MD97420 Gewicht: 148,28 g
		Hersteller: Medion Typ: MD95900 Gewicht: 148,28 g
		Hersteller: Navman Typ: F20 SV 000279 Gewicht: 197,61 g

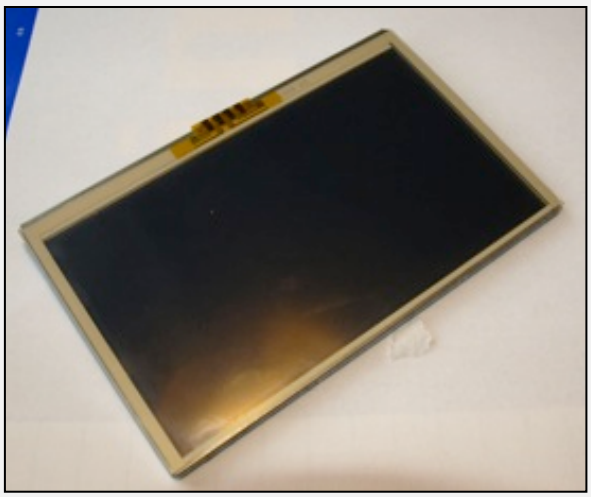
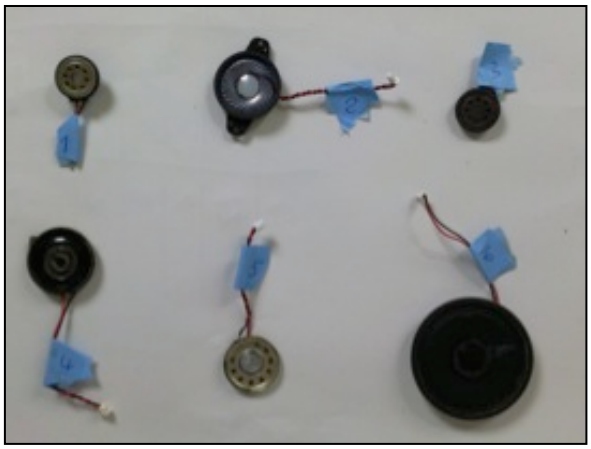
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Hersteller: MyGuide Typ: 00093-187-440 Gewicht: 164,28g
		Hersteller:Blaupunkt Typ: Travel-Pilot Gewicht: 222,49
		Hersteller: Falk Typ: C-Series Gewicht: 193,48 g

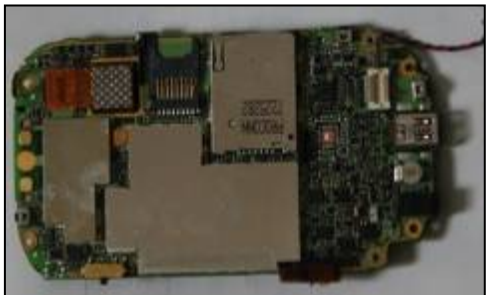
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Hersteller: Navman Typ: F20 AA005809 Gewicht:194,95 g
		Hersteller: Tomtom Typ: One N 14644 Gewicht: 134,54 g
		Hersteller:Blaupunkt Typ: Travel-Pilot 684 Gewicht: 180,30 g

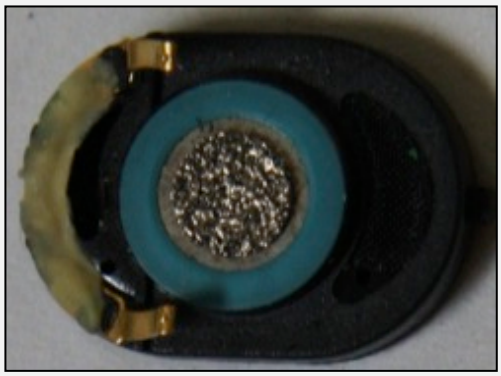
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Hersteller: Tomtom Typ: FCC N14644 Gewicht: 340,09 g
		Hersteller: NavGear Typ: Street-mare Gewicht: 137,19 g
		Hersteller: Navman Typ: iCN 320 Gewicht: 211,35 g

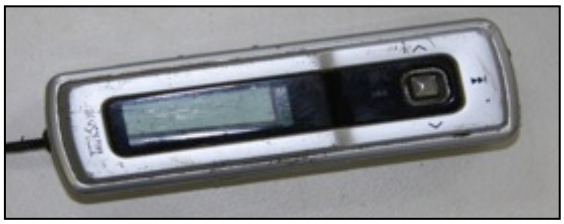
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Hersteller: Tomtom Typ: Go 4D00.001 Gewicht: 316,55 g
Platinen (Beispiele)		Platinen Navigator4000 Gewicht: 34,06 g

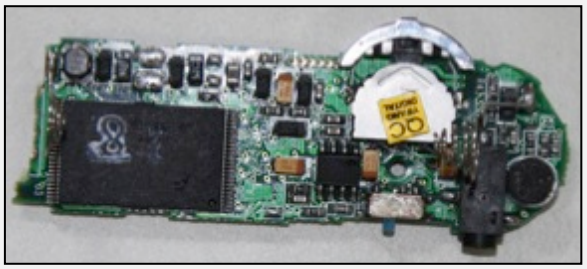
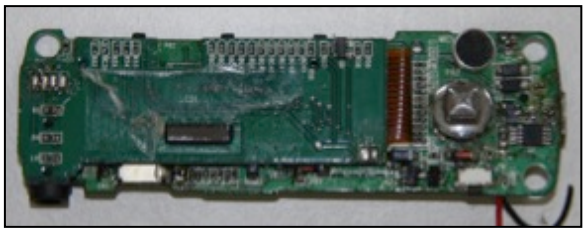
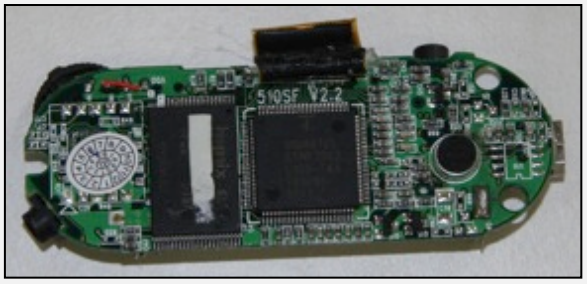
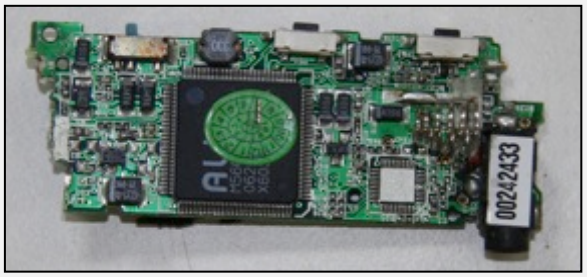
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Platine MD97420 Gewicht: 21,81 g
		Platinen MD95900 Gewicht: 25,13 g
LED (Beispiele)		Gewicht: 1,09 g Anzahl: 83

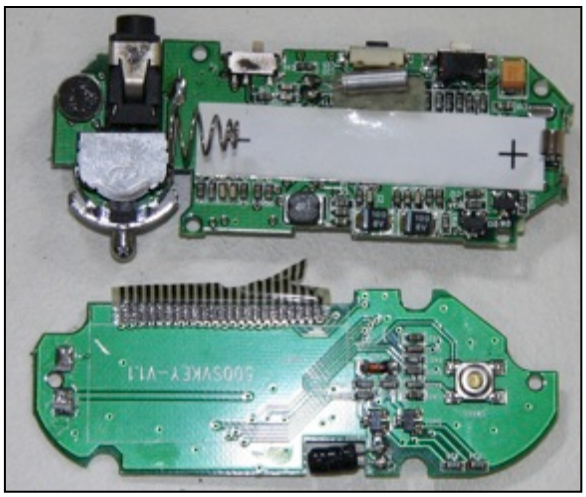
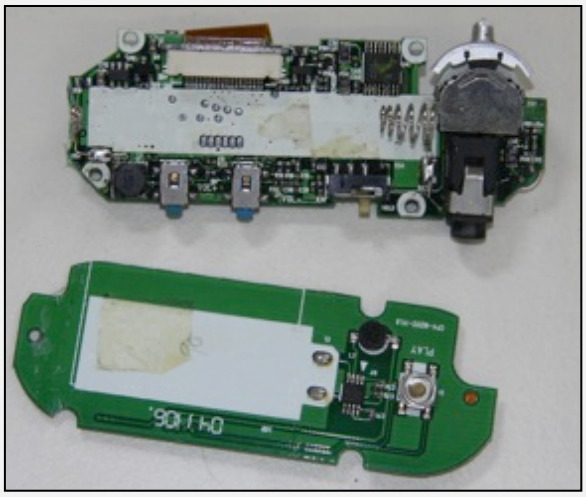
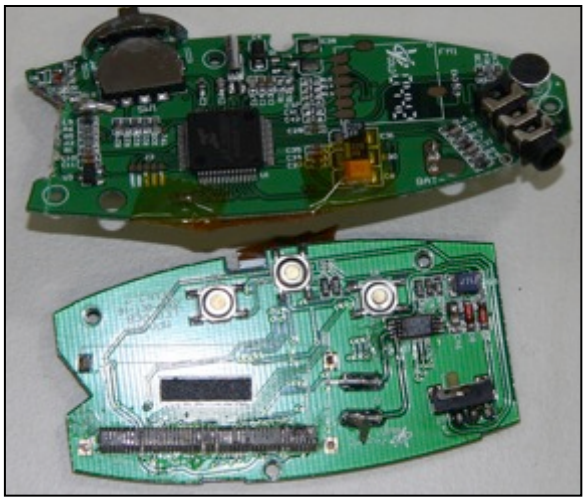
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
Display (Beispiel)		Durchschnittsgewicht: 14,651 g
Lautsprecher (Beispiele)		Lautsprecher1 Navigator 4000 Gewicht: 2,08 g Lautsprecher2 MD97420 Gewicht: 3,8 g Lautsprecher3 MD95900 Gewicht: 1,98 g Lautsprecher4 Travel-Pilot Gewicht: 8,3 g Lautsprecher5 Streetmate

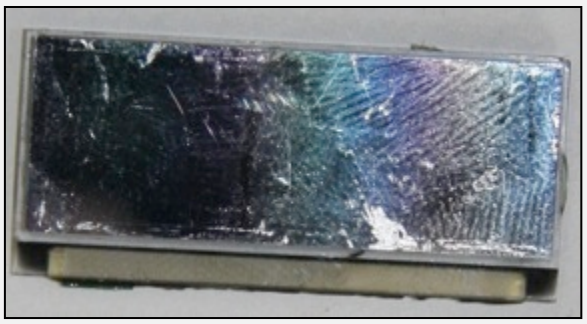
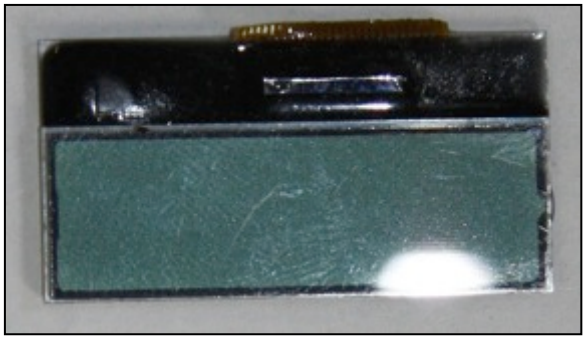
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Gewicht: 3,02 g Lautsprecher6 iCN 320 Gewicht: 13,87 g
3.11 Smartphone		Hersteller: O2 Gewicht: 116,05 g Herstellungsjahr: 2007-05-18
Platine		Gewicht: 24,2 g Bauteilnummer: 50H10063-41M-A

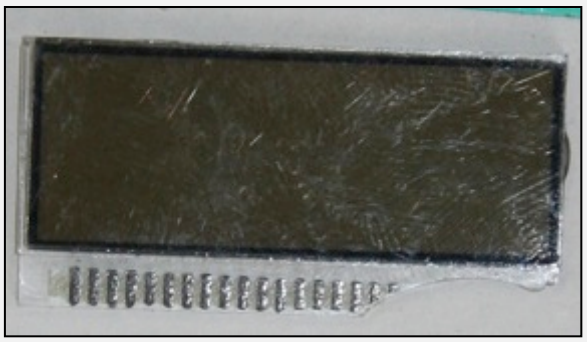
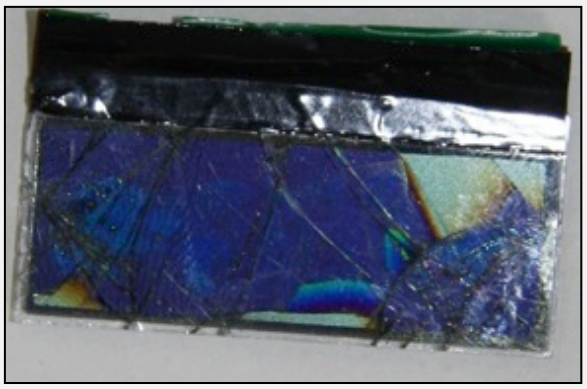
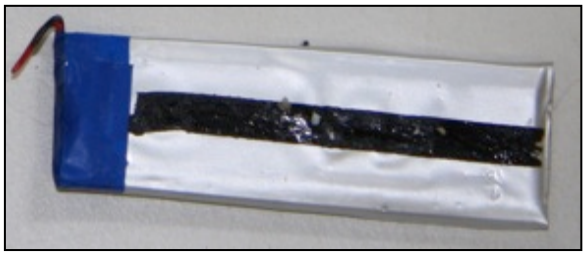
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
Batterie		Gewicht: 23,01 g Bauteilnummer: ELF0160
Display		Gewicht: 5,29 g
Lautsprecher		Gewicht: 1,34
3.21 MP3 Player		Hersteller: TrekStror Typ: MS90 Gewicht: 19,09 g

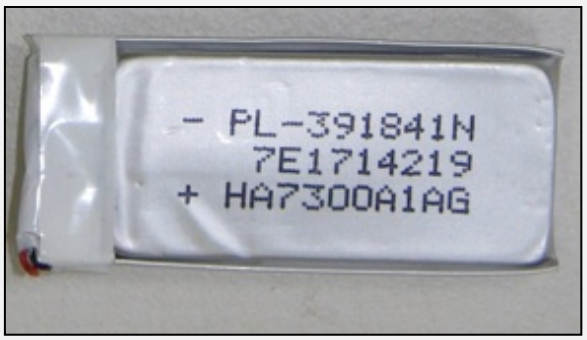
Gerät/Bauteil	Bild	Daten
	       	Hersteller: TrekStor Typ: i.Beat sweez Gewicht: 30,57 g Hersteller: TrekStor Typ: i.Beat fun Gewicht: 22,71 g Hersteller: Samsung Typ: YP-U2R Gewicht: 24,37 g Hersteller: Blu:s Typ: Species 5:15 Gewicht: 21,83 g Hersteller:Digital Player Typ: No Name Gewicht: 33,01 g Hersteller: Support Plus Typ: SP-MP3 Gewicht: 30,66 g Hersteller: elta Typ: -

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Gewicht: 34,33 g
Platinen		Platine MS 90 Gewicht: 5,46 g
		Platine i.Beat sweez Gewicht: 9,38 g
		Platine i.Beat fun Gewicht: 22,71 g
		Platine YP-U2R Gewicht: 5,64 g
		Platine Species 5:15 Gewicht: 6,03 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Platine Digital Player Gewicht: 9,29 g
		Platine SP-MP3 Gewicht: 8,61 g
		Platine elta Gewicht: 12,07 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
Displays		Display i.Beat sweez Gewicht: 1,48 g
		Display i.Beat fun Gewicht: 1,41 g
		Display YP-U2R Gewicht: 1,10 g
		Display Species 5:15 Gewicht: 1,24 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
		Display Digital Player Gewicht: 1,43 g
		Display SP-MP3 Gewicht: 1,65 g
		Display elta Gewicht: 1,50 g
Batterie		Akku i.Beat sweez Gewicht: 9,21 g

Gerät/Bauteil	Bild	Daten
Batterie		Akku YP-U2R Gewicht: 5,72 g

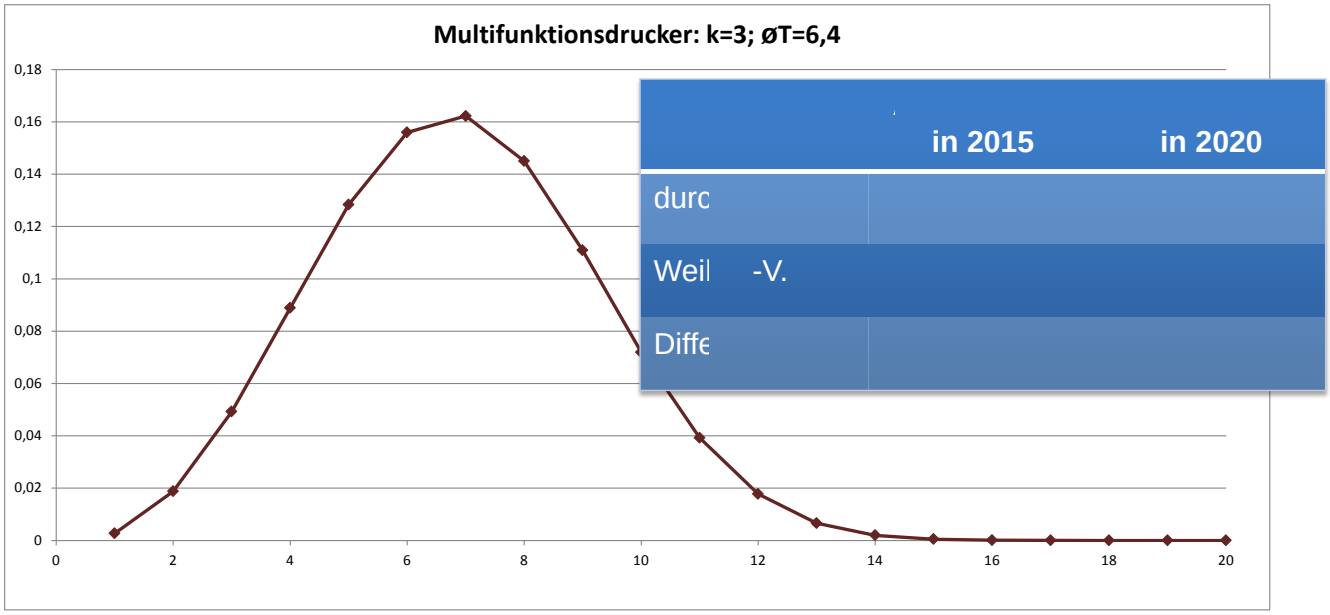
10.3 Anhang Abfallpotenzialberechnung - Weibull vs. mittlere Lebensdauer

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich die Ergebnisse der Berechnung mit einer durchschnittlichen Verweildauer (VD) von der Berechnung über eine Weibull-Verteilung unterscheiden. Die Weibull-Verteilung wurde wie folgt berechnet:

$$f(t) = \lambda * k * (\lambda * t)^{k-1} * e^{-(\lambda * t)^k}$$

Beispiel Multifunktionsdrucker: Da hier die in-Verkehr-gebrachten Mengen relativ gleichbleibend sind ergeben sich bei den beiden Methoden in der Prognose für das Jahr 2020 nur Differenzen von ca. 2 %. Für das Jahr 2015 liegen die Differenzen bei ca. 10 %. (deutlichere Wirkung der Markteinführung und die entsprechenden Schwankungen in den Absatzzahlen).

Abbildung 193: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Multifunktionsdrucker

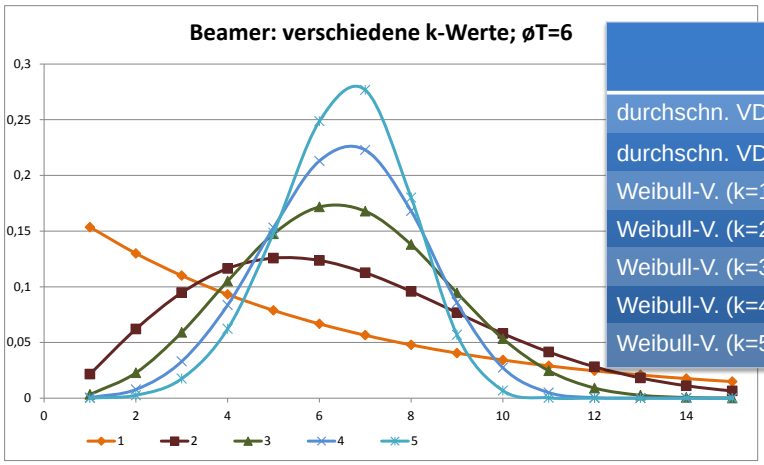


Quelle: eigene Darstellung

Am Beispiel des PC wird das Problem der großen Streuung von Literaturwerten deutlich. Hier liegen die Angaben zum Wert k zwischen 2,2 und 13,19. Die sich ergebenden Unterschiede sind deutlich größer als jene, die durch unterschiedliche Berechnungsmethoden entstehen.

Am Beispiel der Beamer wird die Konsequenz der fehlenden Literaturwerte für die Weibull-Modellierung deutlich. In den Beispielberechnungen wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass die Spannbreite von 1 bis 5,6 liegt, wie dies für vergleichbare Produkte beschrieben wird (NIES 2010; Nomura 2005; Oguchi et al. 2008; OECD 2001; Gößling-Reisemann et al. 2009). Die Ergebnisse zeigen entsprechende Spannbreiten wie sie in der nachfolgenden Grafik dargestellt sind.

Abbildung 194: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Beamer

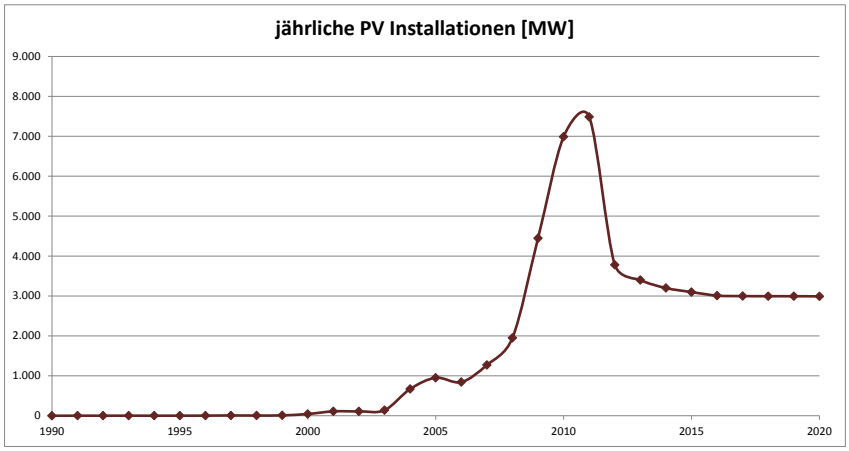


	Abfallmenge 2015	Abfallmenge in 2020
durchschn. VD	182.(	199.
durchschn. VD (øT=5 J.)	294.(	205.
Weibull-V. (k=1)	175.2	196.
Weibull-V. (k=2)	193.2	208.
Weibull-V. (k=3)	201.5	210.
Weibull-V. (k=4)	200.3	207.
Weibull-V. (k=5)	198.2	205.

Quelle: eigene Darstellung

Das Beispiel der Photovoltaik-Module verdeutlicht die Auswirkungen von stark steigenden Inverkehrbringungsmengen (siehe folgende Grafik).

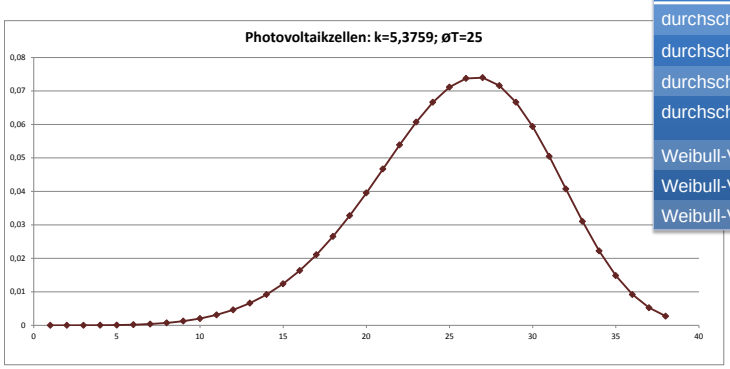
Abbildung 195: Jährliche PV-Installationen in MW(peak)



Quelle: Datengrundlagen BMU 2012b; PHOTON 2012; Moss et al. 2011; eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Die folgende Grafik zeigt die deutlichen Unterschiede der berechneten Abfallmengen je Methode.

Abbildung 196: Vergleich Abfallmenge nach verschiedenen Bestimmungswegen für Photovoltaikzellen



	Abfallmenge in 2015 [MW]	[MW]
durchschn	ø 25 Jahre)	
durchschn	ø 24 Jahre)	
durchschn	ø 20 Jahre)	
durchschn	ø 30 Jahre)	
Weibull-V. (ø 25 Jahre)		
Weibull-V. (ø 20 Jahre)		
Weibull-V. (ø 30 Jahre)		

Quelle: eigene Darstellung

10.4 Schema der Bewertung der Datenqualität bei der Mengenstrombetrachtung

Abbildung 197: Vergleichende Ergebnisse zwischen ear-System-Analyse (ear 2012) und RePro-Analyse (ohne Fehlwürfe) (Basis: Gewicht)

Parameter	Datenquelle(n)	Bewertung	
in Verkehr gebrachte Mengen	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	
	Erhebungen der Konsumgüterforschung oder von Verbänden	5	
	Export/Import und Produktionsstatistiken	4	
	graue Literatur	3	
	Expertenbefragung	2	
	begründete Schätzungen	1	
Verweildauern	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	
	Sonstige Studien über Lebensdauern	5	
	Angaben von Ämtern und Behörden	4	
	Herstellerangaben	3	
	Expertenaussagen	2	
	begründete Schätzungen	1	
Metallkonzentrationen	Primärquellen: Herstellerangaben	6	
	Primärquellen: Recycler, Verwerter (Zerlegestudien und chemische Analysen)	5	
	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	4	
	Graue Literatur	3	
	Expertenaussagen	2	
	begründete Schätzungen	1	
Exporte aus der Nutzungsphase	Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed)	6	
	Erhebung der statistischen Ämter und der Verbände	5	
	Hersteller/ Vertreiberangaben	4	
	Marktstudien, sonstige Literatur	3	
	Expertenaussagen	2	
	begründete Schätzungen	1	

10.5 Anhang Daten zur Nutzwertanalyse

Abbildung 198: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 60:5:35

Kriterien				Gewichtung (%)		Depotcontainer		EAG-Tonne		Händlersammlung gesamt		Wertstoffmobil		Wertstoffhof		Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude		Händlersammlung >400qm	
				Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor (%)	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN
I	Erreichbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit		33,2	10,18	10	101,8	10	101,8	6	61,1	2	20,4	2	20,4	4	40,7	6	61,1
		Lokalisierungsaufwand			10,71	8	85,7	10	107,1	9	96,4	4	42,9	6	64,3	7	75,0	6	64,3
		Lage/zurückzulegender Weg			12,32	9	110,9	10	123,2	9	110,9	8	98,6	3	37,0	8	98,6	6	73,9
Zwischennutzwert I				33,2			**298,4**		**332,1**		**268,4**		**161,8**		**121,6**		**214,3**		199,3
II	Akzeptanz	Erfassung verschiedener Altgerätearten		21,4	7,50	3	22,5	3	22,5	10	75,0	7	52,5	10	75,0	7	52,5	10	75,0
		Transparenz über Verbleib			4,82	8	38,6	8	38,6	8	38,6	8	38,6	8	38,6	8	38,6	8	38,6
		Datenschutz			6,96	5	34,8	5	34,8	5	34,8	5	34,8	5	34,8	5	34,8	5	34,8
		Vermüllung des Standorts			2,14	6	12,9	7	15,0	8	17,1	10	21,4	9	19,3	8	17,1	8	17,1
III	Diebstahlrisiko			5,4	5,36	7	37,5	3	16,1	8	42,9	10	53,6	8	42,9	8	42,9	8	42,9
Zwischennutzwert II + III				26,8			**146,3**		**127,0**		**208,4**		**200,9**		**210,5**		**185,9**		208,4
IV	Zustand	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung		5,0	2,50	5	12,5	6	15,0	7	17,5	10	25,0	5	12,5	7	17,5	7	17,5
		Fehlwurfquote			2,50	6	15,0	4	10,0	8	20,0	10	25,0	9	22,5	7	17,5	8	20,0
Zwischennutzwert IV				5,0			**27,5**		**25,0**		**37,5**		**50,0**		**35,0**		**35,0**		37,5
Zwischennutzwert I bis IV				65,0			**472,1**		**484,1**		**514,3**		**412,7**		**367,1**		**435,2**		445,2
V	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten für Anschaffung	13,4	7,58	5	37,9	6	45,5	7	53,1	2	15,2	1	7,6	8	60,7	7	53,1
			Flächenverfügbarkeit		2,92	7	20,4	8	23,3	6	17,5	10	29,2	0	0,0	9	26,3	7	20,4
			Rechtlicher Aufwand		2,92	7	20,4	8	23,3	9	26,3	9	26,3	5	14,6	9	26,3	9	26,3
		Erfassungsaufwand	Personal	21,6	9,92	7	69,4	5	49,6	7	69,4	4	39,7	5	49,6	5	49,6	7	69,4
			Sortierung		6,42	4	25,7	4	25,7	4	25,7	8	51,3	8	51,3	4	25,7	4	25,7
			Fläche		5,25	9	47,3	10	52,5	7	36,8	10	52,5	9	47,3	10	52,5	7	36,8
Zwischennutzwert V				35,0			**221,1**		**219,9**		**228,7**		**214,1**		**170,3**		**240,9**		231,6
Gesamtnutzwert I bis V				100,0	100,0		**693,2**		**704,0**		**743,0**		**627**		**537,5**		**676,1**		**676,8**

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 199: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 50:10:40

Kriterien				Gewichtung (%)		Depotcontainer		EAG-Tonne		Händlersammlung gesamt		Wertstoffmobil		Wertstoffhof		Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude		Händlersammlung >400qm	
				Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor (%)	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN
I	Erreichbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit		27,7	8,48	10	84,8	10	84,8	6	50,9	2	17,0	2	17,0	4	33,9	6	50,9
		Lokalisierungsaufwand			8,93	8	71,4	10	89,3	9	80,4	4	35,7	6	53,6	7	62,5	6	53,6
		Lage/zurückzulegender Weg			10,27	9	92,4	10	102,7	9	92,4	8	82,1	3	30,8	8	82,1	6	61,6
Zwischennutzwert I				27,7			**248,7**		**276,8**		**223,7**		**134,8**		**101,3**		**178,6**		166,1
II	Akzeptanz	Erfassung verschiedener Altgerätearten		17,9	6,25	3	18,8	3	18,8	10	62,5	7	43,8	10	62,5	7	43,8	10	62,5
		Transparenz über Verbleib			4,02	8	32,1	8	32,1	8	32,1	8	32,1	8	32,1	8	32,1	8	32,1
		Datenschutz			5,80	5	29,0	5	29,0	5	29,0	5	29,0	5	29,0	5	29,0	5	29,0
		Vermüllung des Standorts			1,79	6	10,7	7	12,5	8	14,3	10	17,9	9	16,1	8	14,3	8	14,3
III	Diebstahlrisiko			4,5	4,46	7	31,3	3	13,4	8	35,7	10	44,6	8	35,7	8	35,7	8	35,7
Zwischennutzwert II + III				22,3			**121,9**		**105,8**		**173,7**		**167,4**		**175,4**		**154,9**		173,7
IV	Zustand	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung		10,0	5,00	5	25,0	6	30,0	7	35,0	10	50,0	5	25,0	7	35,0	7	35,0
		Fehlwurfquote			5,00	6	30,0	4	20,0	8	40,0	10	50,0	9	45,0	7	35,0	8	40,0
Zwischennutzwert IV				10,0			**55,0**		**50,0**		**75,0**		**100,0**		**70,0**		**70,0**		75,0
Zwischennutzwert I bis IV				60,0			**425,5**		**432,6**		**472,3**		**402,2**		**346,8**		**403,5**		414,7
V	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten für Anschaffung	15,3	8,67	5	43,3	6	52,0	7	60,7	2	17,3	1	8,7	8	69,3	7	60,7
			Flächenverfügbarkeit		3,33	7	23,3	8	26,7	6	20,0	10	33,3	0	0,0	9	30,0	7	23,3
			Rechtlicher Aufwand		3,33	7	23,3	8	26,7	9	30,0	9	30,0	5	16,7	9	30,0	9	30,0
		Erfassungsaufwand	Personal	24,7	11,33	7	79,3	5	56,7	7	79,3	4	45,3	5	56,7	5	56,7	7	79,3
			Sortierung		7,33	4	29,3	4	29,3	4	29,3	8	58,7	8	58,7	4	29,3	4	29,3
			Fläche		6,00	9	54,0	10	60,0	7	42,0	10	60,0	9	54,0	10	60,0	7	42,0
Zwischennutzwert V				40,0			**252,7**		**251,3**		**261,3**		**244,7**		**194,7**		**275,3**		264,7
Gesamtnutzwert I bis V				100,0	100,0		**678,2**		**683,9**		**733,7**		**647**		**541,5**		**678,8**		**679,4**

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 200: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 40:10:50

Kriterien				Gewichtung (%)		Depotcontainer		EAG-Tonne		Händlersammlung gesamt		Wertstoffmobil		Wertstoffhof		Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude		Händlersammlung >400qm	
				Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor (%)	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN
I	Erreichbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit		22,1	6,79	10	67,9	10	67,9	6	40,7	2	13,6	2	13,6	4	27,1	6	40,7
		Lokalisierungsaufwand			7,14	8	57,1	10	71,4	9	64,3	4	28,6	6	42,9	7	50,0	6	42,9
		Lage/zurückzulegender Weg			8,21	9	73,9	10	82,1	9	73,9	8	65,7	3	24,6	8	65,7	6	49,3
Zwischennutzwert I				22,1			**198,9**		**221,4**		**178,9**		**107,9**		**81,1**		**142,9**		132,9
II	Akzeptanz	Erfassung verschiedener Altgerätearten		14,3	5,00	3	15,0	3	15,0	10	50,0	7	35,0	10	50,0	7	35,0	10	50,0
		Transparenz über Verbleib			3,21	8	25,7	8	25,7	8	25,7	8	25,7	8	25,7	8	25,7	8	25,7
		Datenschutz			4,64	5	23,2	5	23,2	5	23,2	5	23,2	5	23,2	5	23,2	5	23,2
		Vermüllung des Standorts			1,43	6	8,6	7	10,0	8	11,4	10	14,3	9	12,9	8	11,4	8	11,4
III	Diebstahlrisiko			3,6	3,57	7	25,0	3	10,7	8	28,6	10	35,7	8	28,6	8	28,6	8	28,6
Zwischennutzwert II + III				17,9			**97,5**		**84,6**		**138,9**		**133,9**		**140,4**		**123,9**		138,9
IV	Zustand	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung		10,0	5,00	5	25,0	6	30,0	7	35,0	10	50,0	5	25,0	7	35,0	7	35,0
		Fehlwurfquote			5,00	6	30,0	4	20,0	8	40,0	10	50,0	9	45,0	7	35,0	8	40,0
Zwischennutzwert IV				10,0			**55,0**		**50,0**		**75,0**		**100,0**		**70,0**		**70,0**		75,0
Zwischennutzwert I bis IV				50,0			**351,4**		**356,1**		**392,9**		**341,8**		**291,4**		**336,8**		346,8
V	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten für Anschaffung	19,2	10,83	5	54,2	6	65,0	7	75,8	2	21,7	1	10,8	8	86,7	7	75,8
			Flächenverfügbarkeit		4,17	7	29,2	8	33,3	6	25,0	10	41,7	0	0,0	9	37,5	7	29,2
			Rechtlicher Aufwand		4,17	7	29,2	8	33,3	9	37,5	9	37,5	5	20,8	9	37,5	9	37,5
		Erfassungsaufwand	Personal	30,8	14,17	7	99,2	5	70,8	7	99,2	4	56,7	5	70,8	5	70,8	7	99,2
			Sortierung		9,17	4	36,7	4	36,7	4	36,7	8	73,3	8	73,3	4	36,7	4	36,7
			Fläche		7,50	9	67,5	10	75,0	7	52,5	10	75,0	9	67,5	10	75,0	7	52,5
Zwischennutzwert V				50,0			**315,8**		**314,2**		**326,7**		**305,8**		**243,3**		**344,2**		330,8
Gesamtnutzwert I bis V				100,0	100,0		**667,3**		**670,2**		**719,5**		**648**		**534,8**		**681,0**		**677,6**

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 201: Ergebnis der Nutzwertanalyse mit Gewichtungsvariante 35:5:60

Kriterien				Gewichtung (%)		Depotcontainer		EAG-Tonne		Händlersammlung gesamt		Wertstoffmobil		Wertstoffhof		Sammlung am Arbeitsplatz/öffentliche Gebäude		Händlersammlung >400qm	
				Gewichtungsfaktor Gf (%)	Teilgewichtungsfaktor (%)	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN	Zielerfüllungsfaktor Zf	Teilnutzen TN
I	Erreichbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit		19,4	5,94	10	59,4	10	59,4	6	35,6	2	11,9	2	11,9	4	23,8	6	35,6
		Lokalisierungsaufwand			6,25	8	50,0	10	62,5	9	56,3	4	25,0	6	37,5	7	43,8	6	37,5
		Lage/zurückzulegender Weg			7,19	9	64,7	10	71,9	9	64,7	8	57,5	3	21,6	8	57,5	6	43,1
Zwischennutzwert I				19,4			**174,1**		**193,8**		**156,6**		**94,4**		**70,9**		**125,0**		116,3
II	Akzeptanz	Erfassung verschiedener Altgerätearten		12,5	4,38	3	13,1	3	13,1	10	43,8	7	30,6	10	43,8	7	30,6	10	43,8
		Transparenz über Verbleib			2,81	8	22,5	8	22,5	8	22,5	8	22,5	8	22,5	8	22,5	8	22,5
		Datenschutz			4,06	5	20,3	5	20,3	5	20,3	5	20,3	5	20,3	5	20,3	5	20,3
		Vermüllung des Standorts			1,25	6	7,5	7	8,8	8	10,0	10	12,5	9	11,3	8	10,0	8	10,0
III	Diebstahlrisiko			3,1	3,13	7	21,9	3	9,4	8	25,0	10	31,3	8	25,0	8	25,0	8	25,0
Zwischennutzwert II + III				15,6			**85,3**		**74,1**		**121,6**		**117,2**		**122,8**		**108,4**		121,6
IV	Zustand	Qualitätsbeeinträchtigung durch Art der Sammlung		5,0	2,50	5	12,5	6	15,0	7	17,5	10	25,0	5	12,5	7	17,5	7	17,5
		Fehlwurfquote			2,50	6	15,0	4	10,0	8	20,0	10	25,0	9	22,5	7	17,5	8	20,0
Zwischennutzwert IV				5,0			**27,5**		**25,0**		**37,5**		**50,0**		**35,0**		**35,0**		37,5
Zwischennutzwert I bis IV				40,0			**286,9**		**292,8**		**315,6**		**261,6**		**228,8**		**268,4**		275,3
V	Wirtschaftlichkeit & Aufwand	Systemetablierung	Kosten für Anschaffung	23,0	13,00	5	65,0	6	78,0	7	91,0	2	26,0	1	13,0	8	104,0	7	91,0
			Flächenverfügbarkeit		5,00	7	35,0	8	40,0	6	30,0	10	50,0	0	0,0	9	45,0	7	35,0
			Rechtlicher Aufwand		5,00	7	35,0	8	40,0	9	45,0	9	45,0	5	25,0	9	45,0	9	45,0
		Erfassungsaufwand	Personal	37,0	17,00	7	119,0	5	85,0	7	119,0	4	68,0	5	85,0	5	85,0	7	119,0
			Sortierung		11,00	4	44,0	4	44,0	4	44,0	8	88,0	8	88,0	4	44,0	4	44,0
			Fläche		9,00	9	81,0	10	90,0	7	63,0	10	90,0	9	81,0	10	90,0	7	63,0
Zwischennutzwert V				60,0			**379,0**		**377,0**		**392,0**		**367,0**		**292,0**		**413,0**		397,0
Gesamtnutzwert I bis V				100,0	100,0		**665,9**		**669,8**		**707,6**		**629**		**520,8**		**681,4**		**672,3**

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 121: Gewichtung der Kriterien „Erreichbarkeit“, Akzeptanz“ und „Diebstahlrisiko“ mittels Paarvergleich

Kriterium	Erreich-barkeit - Zeitliche Verfügbar-keit	Erreichbar-keit - Loka-lisierungs-aufwand	Erreichbar-keit - Lage/ zurückzule-gende Ent-fernung	Akzeptanz - Erfassung verschiede-ner Sammel-gruppen	Akzeptanz - Transpa-renz über Verbleib	Akzeptanz - Vermül-lung des Standorts	Daten-schutz	Dieb-stahl-risiko	Summe je Krite-rium	Gewich-tungs-faktor Gf (%)	Teilge-wich-tungsfak-tor TGf (%)
Erreichbarkeit - Zeitliche Ver-fügbarkeit		2	1	3	3	4	3	3	19	100,0	17,0
Erreichbarkeit - Lokalisierungs-aufwand	2		1	3	4	4	3	3	20		17,9
Erreichbarkeit - Lage/zurückzu-legende Entfer-nung	3	3		3	4	4	3	3	23		20,5
Akzeptanz - Er-fassung ver-schiedener Sammelgrup-pen	1	1	1		3	3	2	3	14		12,5

Kriterium	Erreich-barkeit - Zeitliche Verfügbar-keit	Erreichbar-keit - Loka-lisierungs-aufwand	Erreichbar-keit - Lage/ zurückzule-gende Ent-fernung	Akzeptanz - Erfassung verschiede-ner Sammel-gruppen	Akzeptanz - Transpa-renz über Verbleib	Akzeptanz - Vermül-lung des Standorts	Daten-schutz	Dieb-stahl-risiko	Summe je Krite-rium	Gewich-tungs-faktor Gf (%)	Teilge-wich-tungsfak-tor TGf (%)
Akzeptanz - Transparenz über Verbleib	1	0	0	1		3	2	2	9		8,0
Akzeptanz - Vermüllung des Standorts	0	0	0	1	1		1	1	4		3,6
Datenschutz	1	1	1	2	2	3		3	13		11,6
Diebstahlrisiko	1	1	1	1	2	3	1		10		8,9
									112		100

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 122: Gewichtung des Kriteriums „Zustand“ mittels Paarvergleich

Zustandsbeschreibung					
		2			
	2				

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 123: Gewichtung des Kriteriums “Wirtschaftlichkeit & Aufwand“ mittels Paarvergleich

		3	4	1	2	3			
	1		2	0	1	1			
	0	2		0	1	2			
	3	4	4		3	3			
	2	3	3	1		2			
	1	3	2	1	2				

Quelle: eigene Darstellung

10.6 Händlersammlung in Europa

Die Mehrzahl der EU-Mitgliedsstaaten hat die Händler von Elektro- und Elektronikgeräten für Haushalte zur Zug um Zug-Rücknahme verpflichtet, wie es in Artikel 5 Absatz 2 Buchstabe b) der WEEE-II Richtlinie bestimmt ist. Viele Staaten haben darüber hinaus eine Pflicht zur 0:1-Rücknahme in größeren Geschäften festgelegt.

Die folgende Tabelle 124 gibt einen Überblick über die Umsetzung der Händlerverpflichtung in der EU.

Tabelle 124: Überblick Umsetzung Händlerrücknahme in Europa

Land	Verpflichtende Händlerrücknahme	Relevanter Gesetzestext
Belgien	1:1 Rücknahme in allen Geschäften, 0:1-Rücknahme bedingt; ansonsten Kommunen	Flandern: VLAREA - Vlaamse Regelment inzake Afvalvoorkoming en-beheer
Bulgarien	Seit 01.01. 2014: 1:1-Rücknahme in allen Geschäften; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Decree No. 256/2013: Ordinance on the Requirements Placing on the Market of Electrical and Electronic Equipment and Treatment and Transportation of Waste Electrical and Electronic Equipment
Dänemark	Nein, Kommunen verantwortlich	Statutory Order no. 130 of 6 February 2014
Estland	Seit 2015: 1:1-Rücknahme in allen Geschäften; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Waste Act 2004, amended 2015
Finnland	1:1-Rücknahme in allen Geschäften seit 1.5.2013, ansonsten Hersteller	Government Decree on Waste Electrical and Electronic Equipment (852/2004) sah keine Verpflichtung der Händler vor, seit 1.5.12 ist in Finnland das neue Abfallgesetz (646/2011) in Kraft
Frankreich	1:1 Rücknahme in allen Geschäften; seit 2014 zudem 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥400 m^2; ansonsten Hersteller	Décret n° 2014-928 of August 19th 2014 relating to the composition of electrical and electronic equipment and to the elimination of waste from this equipment.
Griechenland	Seit 09.05. 2014: 1:1-Rücknahme in allen Geschäften; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Gesetz vom 09 Mai 2014.

Land	Verpflichtende Händlerrück-nahme	Relevanter Gesetzestext
Irland	1:1 Rücknahme, allerdings kann ein anderer Händler oder eine dritte Partei damit beauftragt werden; seit 2014 0:1-Rück-nahme in Geschäften ≥ 400 m^2; für sehr kleine Elektrogeräte; ansonsten Hersteller	Statutory Instrument No. 149 of 2014: Waste Management (Waste Electrical and Electronic Equipment) Regulations 2014.
Italien	1:1-Rücknahme in allen Ge-schäften; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2	Legislative Decree of March 14, 2014 n. 49
Lettland	1:1 Rücknahme, ansonsten Her-steller	Waste Management Law
Litauen	1:1 Rücknahme, ansonsten Kommunen	No. D1-481 on Electrical and Electronic Equipment and its Waste Management (Lith.: Elektros ir elektronines irangos bei jos atlieku tvarkymo taisykles), passed in 2004 by the Minister of Environment (Official Ga-zette, 2004, No. 141-5168; last updated in 2012 Official Gazette No. 82-4291)
Luxemburg	1:1-Rücknahme in allen Ge-schäften; Ausnahme: Platzman-gel; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Ge-schäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Großherzogliche Verordnung vom 30.07.2013
Malta	1:1 Rücknahme, ansonsten Kommunen	L.N. 63 of 2007, Environment Protection Act, Waste Management (Waste Electrical and Electronic Equipment) Regulations, 2004
Niederlande	1:1 Rücknahme, 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥400m2; Prüfung möglich; ansonsten Kommunen	WEEE management regulations Nr. 2975 vom 5. Februar 2014.
Norwegen (nicht EU, aber Umset-zung der WEEE RL)	1:1 Rücknahme, ansonsten Her-steller	Waste regulations: Chapter 1 Waste electri-cal and electronic equipment ?!

Land	Verpflichtende Händlerrücknahme	Relevanter Gesetzestext
Österreich	1:1 Rücknahmepflicht für Händler mit einer Verkaufsfläche von mindestens 150 m^2; Ausnahmen möglich, wenn andere Sammelstellen angeboten werden.	EAG-VO idF BGBl. II Nr. 193/2014
Polen	1:1 Rücknahme, ansonsten Hersteller; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	Act of 29 July 2005 on Waste Electrical and Electronic Equipment
Portugal	1:1 Rücknahme, 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2	Decree-Law No. 67/2014 instituting the Legal Regime of Waste Derived from Electric and Electronic Equipment (REEE)
Rumänien	1:1 Rücknahme („shall"), , ansonsten Kommune; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	Romanian Government Decision on waste electric and electronic equipment No. 448 of May 19th 2005
Schweden	Seit 2014 1:1 Rücknahme; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Förordning (2014:1075) om producentansvar för elutrustning
Schweiz (nicht EU)	1:1-Rücknahme, 0:1-Rücknahme	Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) 2005
Slovenien	Nein, Kommunen verantwortlich; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	
Slowakei	1:1 Rücknahme, ansonsten Hersteller; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	Act No. 223/2001 Coll. of May 15, 2001 on waste and on amendment of some acts as amended by several amendments
Spanien	1:1 Rücknahme, ansonsten Kommunen; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	REAL DECRETO 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.
Tschechien	Seit 2014 1:1 Rücknahme; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	Waste Act 184/2014
UK	1:1 Rücknahme; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2, außer Händler schließen sich einem „take back scheme"; an ansonsten Hersteller	2013 No. 3113 ENVIRONMENTAL PROTECTION, The Waste Electrical and Electronic Equipment Regulations 2013

Land	Verpflichtende Händlerrücknahme	Relevanter Gesetzestext
Ungarn	Seit 2014 1:1 Rücknahme; 0:1-Rücknahme von sehr kleinen Elektrogeräten in Geschäften ≥ 400 m^2; ansonsten Hersteller	197/2014. (VIII. 1) Government Decree. waste management activities related to electrical and electronic equipment
Zypern	Nein, Hersteller verantwortlich; 2012/19/EU noch nicht umgesetzt	Administrative Act No 668 of 2004, published in Official Gazette No 3888, Annex III (I), on 30/07/2004

10.7 Rückgewinnungsverfahren

In einigen Fällen sind Vorbehandlungsschritte integrale Bestandteile von Rückgewinnungsanlagen. Beispiele hierfür sind in Tabelle 125 aufgeführt.

Tabelle 125: Rückgewinnungsanlagen die ebenfalls eine Vorbehandlung durchführen

Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
Hitachi	Matsudo City	JPN	Magnete von Festplatten, Motoren , Klimaanlagen und andere Kompressoren	Mechanische Separation ohne Shredder
Umicore	Olen	BE	Batterien	Mechanische Vorbehandlung
Umicore	Hoboken	BE	Altkatalysatoren, EAG & Leiterplatten (geschreddert und ungeschreddert), Handys Telefone, Komponenten mit hohem Anteil an Edelmetallen wie z. B. mehrschichtige Kondensatoren	Mechanische Vorbehandlung
Rhodia Rare Earth Systems	Saint-Fons	FR	Phosphorpuder aus dem Altlampenrecycling	Mechanische Vorbehandlung

Des Weiteren bestehen mehrstufige Prozessketten an unterschiedlichen Standorten und Firmen, bei denen jeweils unterschiedliche RePro-Metalle separiert werden. Solche übergreifenden Prozessketten wurden zur besseren Übersichtlichkeit gekennzeichnet. Die Erstrückgewinnungsanlage mit hellblau, und die Folgerückgewinnungsanlage mit blau. Erst- und Folgerückgewinnungsanlagen innerhalb eines Standortes werden in den folgenden Übersichtstabellen ggf. in der letzten Spalte „Prozessart“ unterschieden. In einigen Fällen war es nicht möglich,die entsprechenden Informationen zu erhalten. Die fehlenden Informationen wurden mit „keine Angabe“(k. A.) gekennzeichnet.

10.7.1 Großtechnische Rückgewinnungsanlagen für post consumer Abfälle

Tabelle 126: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente aus post consumer Abfällen

RePro-Metalle, die in der Anlage zurückgewonnen werden	Firmenname	Ort	Land[73]	Input Material	Prozessart	
Au, Ag, Pd, Pb-Sn-Zn Mischoxid	Montanwerke Brixlegg	Brixlegg	AT	Altmetall	Pyro- & Hydrometallurgie	Kupferhütte, Elektrolyse, Edelmetallabscheidung
Schwarzkupfer	LS Nikko Global Resources & Material (GSM)	Danyang	KOR	Mobiltelefone, EAG	Pyrometalurgie	Sekundärkupferhütte
Ag, Au, Pd	LS Nikko Copper	Onsan	KOR	Leiterplatten, Schwarzkupfer aus Danyang	Pyro- & Hydrometallurgie	Primärkupferhütte, Elektrolyse
Angereicherte Schlacken/Aschen	Nikko Tsuruga Recycle Co., Ltd. (JX Nippon Group)	Tsugura	JPN	Elektro(nik)schrott, , Mobiltelefone, Leiterplatten	Pyrometallurgy	Vorbehandlung und vermt.Wirbelschichtofen

[73] Ländercodierung basiert auf http://publications.europa.eu/code/en/en-370100.htm für EEA und EU 27 und für Drittländer auf http://unstats.un.org/unsd/methods/m49/m49alpha.htm

RePro-Metalle, die in der Anlage zurückgewonnen werden	Firmenname	Ort	Land[73]	Input Material	Prozessart	
Kupferanoden	Saganoseki Smelter & Refinery (JX Nippon Group)	Saganoseki	JPN	Angereicherte Schlacken/Schrotte	Pyrometallurgie	Kupferhütte
Anodenschlamm	Hitachi Metals Recycling Complex (HMC) (JX Nippon Group)	Hitachi	JPN	Kupferanoden	Hydrometallurgisch	Elektrolyse
Sn, In, Sb, Ag, Au, Pd	HMC (JX Nippon Group)	Hitachi	JPN	Schlacke aus dem Kupferprozess, Elektronikschrotte, Anodenschlamm	Hydrometallurgisch	k. A
Sn, In, Ag, Au, Pd	Umicore	Hoboken	BE	Altkatalysatoren, EAG & Leiterplatten (geschreddert und ungeschreddert), Handys Telefone, Komponenten mit hohem Anteil an Edelmetallen wie z. B. mehrschichtige Kondensatoren	Pyro & Hydrometallurgie	Kupferhütte mit Bleiraffination & Elektrolyse, Edelmetallhütte
In, Sb	Teck's Trail	British Columbia	CAN	CRT, Computerteile, Leiterplatten	Pyrometallurgie	Zink-Bleihütte
Vorstufe (Herstellung von Kupferanoden)	Xstrata copper	Rouyn-Noranda, Quebec	CAN	Kupferkonzentrate aus Minen, kupfer und edelmetallhaltige Altmaterialien	Pyrometallurgie	Kupferhütte

RePro-Metalle, die in der Anlage zurückgewonnen werden	Firmenname	Ort	Land[73]	Input Material	Prozessart	
Au, Ag, PGM	Xstrata copper	Montréal-East	CAN	99,1 % Kupferanoden	Hydrometallurgie	Elektrolyse
Au, Ag, Pd, In	Shanghai Asahi Pretec Co., Ltd. (Asahi Holding Group)	Verschiedene Standorte		Produktionsabfälle und Postconsumer Abfälle von Computern, elektronische Teilen aus Handys und anderen Geräten und Leiterplatten	Hydrometallurgie	Elektrolyse
Vorstufe	KRS (Aurubis)	Lünen	DE	EAG, Leiterplatten	Pyro & Hydrometallurgie	(Sekundär)Kupferhütte, Elektrolyse
Au, Ag, Pd	Aurubis	Hamburg	DE	Leiterplatten	Pyro & Hydrometallurgie	(Primär)Kupferhütte, Elektrolyse, Edelmetallhütte
Sn (Sn-Pb-Legierung)	KRS (Aurubis)	Lünen	DE	EAG, Leiterplatten	Pyro & Hydrometallurgie	(Sekundär)Kupferhütte, Elektrolyse
SE	MCP Sidech	Tilly	BE	Leuchtschicht aus Gasentladungslampen	k. A.	
SE	MCP-HEK GmbH	Lübeck	DE	Bildschirmleuchtschicht	k. A.	

RePro-Metalle, die in der Anlage zurückgewonnen werden	Firmenname	Ort	Land[73]	Input Material	Prozessart	
SE-Konzentrat	Rhodia Rare Earth Systems	Saint-Fons	FR	Phosphorpuder aus dem Altlampenrecycling	Hydrometallurgisch	Fest-Flüssig-Extraktion
SE (Y, La, Ce, Eu, Gd, Tb)	Rhodia	La Rochelle	FR	Leuchtschichten aus Gasentladungslampen und Bildschirmen	Hydrometallurgie	Lösemittelextraktion
Au, Ag, Sn, Sb	Kosaka Smelting and refining (Dowa Group)	Kosaka	JPN	Prozessoren, Festplatten, Leiterplatten, Stecker, Metallschrott, Handys	Pyrometallurgie	Kupferhütte
Au, Ag, Pd, In	Mitsui Kinzoku Group	Verschiedene Standorte	JPN	Elektroschrott, Leiterplatten	Hydro & Pyrometallurgie	Verschiedene Hüttenarten & Elektrolyse
PGM, Ag, Au	Boliden	Rönnskär	SE	Elektronikschrotte	Pyrometallurgie	Kupferhütte
Hg-freie Lampenabfälle	AERC Recycling solutions	Allentown, Pennsylvania	USA	Gasentladungslampen	Pyrometallurgie	(mech. Vorbehandlung &) Röstofen
Yttrium, Europium, Terbium	Global Tungsten & Powders Corp. (GTP)	Towanda, Pennsylvania	USA	Quecksilberfreie Lampenabfälle	Hydrometallurgie	k. A.

RePro-Metalle, die in der Anlage zurückgewonnen werden	Firmenname	Ort	Land[73]	Input Material	Prozessart	
Y, In, Ag, Au, Li	HydroWEEE	mobil (Anlage befindet sich in einem Seecontainer)		Leuchtschicht von Kathodenstrahlröhren, LCD-Bildschirme, Lithium-Ionen Batterien, Leiterplatten	Hydrometallurgie	Elektrolyse
Ag, Au, Pd, Sn, Sb(2O3), In, Co	Mitsui Kinzoku Group Network	Verschiedenen Standorte	Japan	Altbatterien, Elektroaltgeräte, Edelmetallhaltiger Schrott	Pyrometallurgisch	Blei- und Kupferhütten

10.7.2 Pilot- oder geplante Anlagen, Patente

Tabelle 127: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für RePro-Metalle im Pilotmaßstab, als geplante Anlagen oder als patentgeschützte Verfahren

Geplante Rückgewinnung von:	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
Nd	Ames Laboratories	Ames, Iowa	USA	Nd-Magneten	Pyrometallurgisch
PGM	Tetronics (Hersteller)	Swindon, Wiltshire	UK	Elektroaltgeräte	Pyrometallurgisch
SE	Mitsui Metal Mining Co	Takehara-shi	JPN	NiMh-Batterien	k. A.
SE (Absichtserklärung)	Dowa Group	Kosaka	JPN	Prozessoren, Festplatten, Leiterplatten, Stecker und Metallschrott, Handys	Pyrometallurgie
SE	Loser Chemie	Langenweißbach	DE	Dünnschicht-PV-Module (perspektivisch auch Magnete und andere Abfälle)	Hydrometallurgisch
SE (Endproduktehersteller)	Vacuumschmelze GmbH	Hanau	DE	Produktionsabfälle	Pyrometallurgie
Pd	Uni Gießen (u. A.)	Gießen	DE	Metallhaltige Abfälle und Abwasser[74]	Biometallurgisch
SE, Edelmetalle	Fraunhofer- IGB	Stuttgart	DE	Niedrig konzentrierte Metallsalzlösungen	Bioleaching sowie Elektrophorese/Elektrolyse
SE (Nd, Sm)	Fraunhofer IFAM	Dresden	DE	Magnetwerkstoffe und Magnetwerkstoffgemische	Pyro- und Hydrometallurgisch
SE	Fraunhofer ICT; Fraunhofer- (IBP)	Pfinztal, Holzkirchen	DE	MVA-Schlacke	Molecular Sorting

[74]Forschungsprojekt Nanopop, ob eine Anwendung auf EAG möglich ist, ist unklar, laut (Euwid 2013) wird das Potenzial dieses Verfahrens eher im Bereich der Behandlung von Abwässern und Sanierung von Umweltverschmutzungen gesehen.

Geplante Rückgewinnung von:	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
SE (NdFeB)	Universität Birmingham	Birmingham	UK	NdFeB-Magnete aus Festplatten	Feststoffsintern mit Hydrogen (Urform-Fertigungsverfahren)
Ag, Au, Pd, Sn, In, SE	ATMI	Danbury, Connecticut	USA	Leiterplatten, Platinen, Kompaktleuchtstofflampen	Hydrometallurgie
Au	DERA und BGR	Hannover	DE	Flugaschen	Biolaugung
SE	Rhodia	La Rochelle	FR	Industrie-Schlacke aus Hochöfen	Hydrometallurgisch
Au, Pd, Ga, In, SE(Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Ce, La)	Ecoloop GmbH Goslar	Goslar	DE	Schrott, E-Schrott und/oder ganze elektronische Altgeräte; Aschen	Pyrometallurgisch
SE (Eu, Y,Ce, La, Gd)	OSRAM AG	München	DE	Leuchtstoffe aus Leuchtstofflampen	Hydrometallurgisch
SE	KALI Umwelttechnik GmbH (K-UTEC)	Sondershausen	DE	Batteriemodule	Hydrometallurgisch
SE (Y, Eu, Sm, Tb und weitere)	Kasei Optonix	Tokio	JPN	Leuchtstoffabfall	Hydrometallurgisch
Pd, SE (Ga, Y, Eu)	Sumitomo Chemical Co	k. A.	JPN	Erze, Erzschlacken, Katalysatorausschuß	Hydrometallurgisch
SE	Santoku metal industry Co. Ltd.	Kobe	JPN	SE und Nickel enthaltender Legierungsschrott	Hydrometallurgisch
Y, Eu	Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH	München	DE	Leuchtstofflampen	Hydrometallurgisch

Geplante Rückgewinnung von:	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
Au, Pd	Freiberger Ne Metall Gmbh	Freiberg	DE	Bauelementen der Elektrotechnik/Elektronik/ Mikroelektronik	Hydrometallurgisch
Au, Pd, SE (Nd, Y, Ga, In, Gd)	ZAR und Kezo	Hinwil (Zürich)	CH	MVA-Schlacke	Pyrometallurgisch
SE (Nd, La)	Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächen-technik (IST)	Braunschweig	DE	Dauermagnete, FCC-Kats	Hydrometallurgisch
Y, Eu, Gd, Tb, Ce, La	Uni Leoben, Saubermacher AG	Graz, Leoben	AT	Lithium-Ionen Batterien	Vorbehandlung, Pyro- & Hydrometallurgie
SE-Doppelsulfat (Sx, La, Nd, Ce, Pr, Sm, Y)	Uni Leoben	Leoben	AT	NiMH-Batterien	Vorbehandlung & Hydrometallurgisch
SE (Y, Eu, Gd, Tb, Ce, La)	Uni Leoben	Leoben	AT	Leuchtstoffe aus Energiesparlampen	Vorbehandlung & Hydrometallurgie
Co, SE (Nd)	Uni Leoben	Leoben	AT	Magnete aus der Demontage von Elektro- und Elektronikgeräten	Prozessschritt 1: Hydrometallurgie
Au, Sn					Prozessschritt 2: Pyrometallurgie
k. A.	Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie	Freiberg	DE	Aschen und Schlacken	phys. Und chem. Verfahren

Geplante Rückgewinnung von:	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
SE	Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie	Freiberg	DE	Leuchtstoffe	Bioleaching
Au, Ag, Pd	Aurubis	Pirdop	BG	(geplant) Leiterplatten	Pyro- und Hydrometallurgie
Edelmetallhaltige Schlacke	Currenta, und Accurec Recycling GmbH	Krefeld-Uerdingen& Mühlheim	DE	Batterien	Pyrometallurgisch
Angereichertes Gemisch mit Edelmetallen und SE	Ecoloop GmbH	Goslar	DE	Schrott, E-Schrott, EAG, Aschen, Batterien, Dauermagnete	Pyrometallurgisch
Au, Pd, SE (Nd, Y, Ga), In,	ZAR und Kezo	Hinwil	CH	MVA-Schlacke	Pyrometallurgisch
SE (Eu, Y)	OSRAM AG	München	DE	Leuchtstoffe aus Leuchtstofflampen	Hydrometallurgisch
Y, Eu	Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH	München	DE	Leuchtstofflampen	Hydrometallurgisch
Nd, Dy	University of Tokio	Tokio	JP	NdFeB-Magnete	Pyrometallurgisch
SE, Ag	Verschiedene Institutionen[75]	verschieden	verschieden	Abwässer	Biosorption
SE (La,Nd, Dy, Pr, Sm, Ce)	Treibacher Auermet	Althofen	AT	NiMH-Batterien	Vorbehandlung & Hydrometallurgie

[75]Überblick in http://cdn.intechopen.com/pdfs/16643/InTech-Biosorption_of_metals_state_of_the_art_general_features_and_potential_applications_for_environmental_and_technological_processes.pdf

Geplante Rückgewinnung von:	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
Au, Pd	Saxonia AG	Halsbrücke	DE	Metallegierungen auf elektronischen/elektrotechnischen Bauteile	Hydrometallurgisch

10.7.3 Einsatz von nicht-post-consumer Abfällen

Die in der folgenden Tabelle genannten Anlagen setzen derzeit keine post consumer-Abfälle ein, wie sie die RePro-Produkte darstellen, gewinnen jedoch teilweise RePro-Metalle aus Produktionsabfällen zurück und stellen somit potenzielle Basen für Prozessfortentwicklungen dar.

Tabelle 128: Vorläufige Liste der weltweiten Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente aus nicht-post consumer Abfällen

Element	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozessart
SE	Shin Etsu	Tokyo	JPN	Recycling von Produktionsabfällen	Pyro & Hydrometallurgie
Ag, Au	Wesermetall	Nordenham	DE	Bleihaltige Sekundärstoffe wie Batteriepaste, Metallics, Batterieplatten oder Aschen.	Pyrometallurgie
SE (La, Y, Cr, Gd, Nd, Dy) SE-Mischmetalle (La, Nd, Pr, Co	Treibacher AG	Althofen	AT	derzeit keine post consumer EAG als Input, verbrauchte Katalysatoren aus der chemischen, petrochemischen, der Pharma- und der Lebensmittelindustrie, Kessel- oder Vergasungsrückstände aus der Öl-Verbrennung oder –vergasung, Nickel-Galvanik-Rückstände, Hochleistungskeramik, Produktionsrückstände	Pyrometallurgie
Ga, In	Molycorp	Peterborough	CAN	Minderwertige Herstellerabfälle und –rückstände	Hydrometallurgie
Pd	Jiangmen Asahi Pretec Kanfort Environmental Company (Joint Venture mit Asahi Holding Group)	Jiangmen City, Guangdong	CHN	Industriekatalysatoren	Hydro- und Pyrometallurgisch

Element	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozess-art
Ta	Buss & Buss	Sagard	DE	Produktionsabfälle	Pyrome-tallurgie
Ta	H.C. Starck	Go-slar/Mün-chen	DE	Produktionsabfälle und Schrotte	Pyro & Hydro-metallur-gie
Co, ggf. weitere	Nickelhütte Aue	Aue	DE	industrielle verbrauchte Kataly-satoren	Pyro- & Hydro-metallur-gie
Ga, In	Preussag Pure Metals	Langels-heim	DE	Nebenprodukte anderer Metall-industrien, Schrotte und Rück-stände aus der Waferbearbei-tung	Hydro-metall-urige
Ga	Nalco	Angul	IND	Ablauge der Aluminiumoxid-Raf-finerie	Hydro-metallur-gisch
Ga	Magyar Alumi-nium	Ajka	HU	Nebenprodukt des Bayer Prozes-ses zur Aluminiumproduktion	Hydro-metallur-gisch
In, Ga	Akita Rare Metals (Dowa Group)	Iijima	JPN	ITO haltige Produktionsabfälle	Pyrome-tallurgie
Ag, In	Usuda Manfactur-ing Co Ltd (Ashai Holding Group)	Tomi City, Nagano	JPN	Produktionsabfälle von Plasma- und LCD Bildschirme	Pyrome-tallurgie
SE	LCM	Liverpool	UK	Magnete (Produktionsabfälle)	Pyrome-tallurgie
La, Ce, Nd, Pr	Japan Metals & Chemicals (JMC) und Honda	Tokio	JPN	NiMH-Batterien	Hydro-metallur-gie
PGM	Nippon PGM (Dowa group)	Kosaka	JPN	Alte Katalysatoren	Pyrome-tallurgie
Pd	Heraeus	Hanau	DE	Katalysatoren, System an unterschiedl. Einsatz-materialien anpassbar	Pyrome-tallurgie
In, Ga	Lobbe Industrie-service	Espenhain	DE	kristalline und Dünnschichtso-larzellen	Hydro-metallur-gie

Element	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozess-art
Ent-schich-tete Mo-dule	Sunicon	Freiberg und Bitter-feld/ Wol-fen	DE	Solarzellen (kristallin und Dünn-schicht)	Hydro-metallur-gie
Pd	Duesmann & Hensel Recycling GmbH (DHR) undDuesmann & Hensel Internatio-nal GmbH (DHI)	Aschaffen-burg	DE	Katalysatoren	Pyrome-tallur-gisch
Au, Pd	Provaluta Metall Recycling GmbH	Karlsruhe	DE	Katalysatoren	Pyrome-tallurgie
Pd	UMICORE AG & CO KG, DE	Pforzheim	DE	edelmetallhaltigen Katalysatoren	Pyro- & Hydro-metallur-gie
Pd	UMICORE AG & CO KG	Pforzheim	DE	Industrie- und Autokatalysato-ren	Pyro- & Hydro-metallur-gie
Ag, Co, SE (Ce, SM, Nd)	Hydrometal SA	Engis-Liège	BE	Flugasche, Altkatalysatoren, Glaspolierpulver, Industrieab-fälle, Zink(phosphat)zement	Hydro-metallur-gie
In, Sn, Co, Ta	Exotech	Pompano Beach, Florida	USA	Industrie- und Produktionsab-fälle, z. B. Sputtertargets	Verschie-dene (mecha-nisch, chemisch und ther-misch)
Ga	Freiberger Com-pound Materials GmbH (FCM)	Freiberg	DE	Prozessrückständen (Ätzlösun-gen der Herstellung von Ga-Wafer u –Chips)76	Hydro-metallur-gie
SE-Kon-zentrat	Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecyc-ling RWTH Aachen	Aachen	DE	Unvernickelte NdFeB-Magnete aus der Produktion von Festplat-tenmagneten	Pyro- und hyd-rometal-lurgisch

[76] Laut (Stelter pers. comm. 2013) kann das Verfahren auch auf EAG angewendet werden, wenn Silizium- und Galliumchips getrennt gesammelt werden.

Element	Firmenname	Ort	Land	Input Material	Prozess-art
Ag, Au, In	Korea Zinc	Seoul	KOR	Zink und andere Nebenprodukte	Pyrome-tallur-gisch
Co	Gulf chemical & Metallurgical Corp	Freeport	USA	gebrauchte Katalysatoren (Ni-ckel/Moly und Kobalt/Moly- Ka-talysatoren mit oder ohne Vana-dium)	Pyro & Hydro-metallur-gie
Au, Ag, Pd	Saxonia	Halsbrü-cke	DE	Industrieabfälle	Pyrome-tallur-gisch
SE, Co ggf. Ni (Kon-zentrat, geht zu Rhodia)	Umicore	Olen	BE	Batterien	Pyrome-tallurgie
SE (Ce, La, Nd, Pr)	Rhodia	La Ro-chelle	FR	NiMh-Batterien (Inputstoffe von Umicore)	Hydro-metallur-gie
Co	Xstrata Nickel (vorstufe für Xsta-rata in Norwe-gen)	Sudbury-Ontario	CAN	Li-Ion-Altbatterien	Pyrome-tallur-gisch
Co	Xstrata Nickel-Nikkelverk Re-finery	Kristia-nssand	NO	Granalien aus Li-Ion-Altbatterien	Hydro-metallur-gisch

10.7.4 Forschung

Tabelle 129: Liste der dokumentierten Forschungen zur Rückgewinnung vonRePro-Metalle

Zielmetalle	Forschername/-insti-tution	Land	Input Material	Prozessart
SE	Lyman u Palmer, 1995	USA	NiMH-Batterien	Hydrometallur-gisch
SE (Y, Eu, Ce, La, Tb, Gd)	Hirajima et al., 2005a	JPN	Leuchtstoffe	Hydrometallur-gisch
SE (Y, Eu, Ce, La, Tb, Gd)	De Michelis et al., 2011	IT	Leuchtstofflampen	Hydrometallur-gisch
SE	Zhang et al., 1999	JPN	NiMH-Batterien	Hydrometallur-gisch
SE	Li et al., 2009	JPN	NiMH-Batterien	Hydrometallur-gisch

Zielmetalle	Forschername/-institution	Land	Input Material	Prozessart
SE	Kanamori et al., 2009	JPN	NiMH-Batterien	Hydrometallurgisch
SE	Provazi et al., 2011	BRA	NiMH-Batterien	Hydrometallurgisch
SE, Co	Shen – Baotou Institute for rare earths	CHN	SmCo Schlacke	Hydrometallurgisch
Sm, Co	Kuniaki Murase – Baotou Institute for rare earths	CHN	SmCo-Gemisch	Dampfphasentechnologie
Co, SE	Xu Tao- Baotou Institute for rare earths	CHN	Kobaltreiche Schlacke	Hydrometallurgisch
Co, SE	Xu Liyang – Baotou Institute for rare earths	CHN	NiMh-Batterien	Hydrometallurgisch
RE	Lin Caishun – Jiangxi University of Science & Technology	CHN	NiMh-Batterien	Hydrometallurgisch
SE	Xu Tao – Baotou Institute for rare earths	CHN	gebrauchtes Polierpulver(in flüssiger und fester Phase)0	Hydrometallurgisch
SE	Baotou Institute for rare earths	CHN	Gebrauchte Leuchtstofflampen	Mechanisch &Hydrometallurgisch
SE	Baotou Institute for rare earths	CHN	Schlacke aus der Eisen- und Stahlindustrie	Hydrometallurgisch

(Intecus pers.com. 2013, angepasst durch Ökopol; Xu & Wang 2013)

10.7.5 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle zeigt vereinfachend die bestehenden großtechnischen Rückgewinnungsanlagen für RePro-Metalle[77] aus post-consumer-Abfällen.

[77]Welche Metalle genau zurückgewonnen werden, sind an den Farb- und Kreuzmarkierungen zu erkennen.

Tabelle 130: Rückgewinnungsanlagen für rr-Elemente im Überblick

Firmenname	Ga	Au	In	Co	Pd	Ag	Ta	Sn	Sb	SE	Y	La	Ce	Eu	Gd	Tb	Prozessart
Mitsui Kinzoku Gruppe		X	X		X	X		X	X								Verschiedene Kupfer- Blei –Zink-Edelmetallhütten und hydrometallurgische Schritte
Umicore-Hoboken		X	X		X	X		X	X								Sekundärkupferhütte, Bleiraffination, Elektrolyse, Edelmetallhütte, Metallveredelungsstufe
JX Nippon Gruppe		X	X		X	X		X	X								Kupferhütte, Elektrolyse, Metallveredelungsstufe
Aurubis-Lünen		X			X	X		X									Sekundärkupferhütte, Elektrolyse
Montanwerke Brixlegg		X			X	X		X									Primärkupferhütte, Elektrolyse, Edelmetallabscheidung
Aurubis-Hamburg		X			X	X			X								Primärkupferhütte, Elektrolyse, Bleiraffination, Edelmetallhütte
Dowa Kosaka		X				X		X	X								Kupferhütte
LS Nikko		X			X	X											Primär- und Sekundärkupferhütten, Elektrolyse
Xstrata copper		X			X	X											Kupferhütte, Elektrolyse
Boliden		X			X	X											Kupferhütte
Teck's Trail			X						X								Zink-Bleihütte
MCP Tilly/Lübeck										X[78]	X	X	X	X	X	X	Keine Informationen
Rhodia										X	X	X	X	X	X	X	Vorbehandlung & Hydrometallurgie

[78]Welche Seltenen Erden genau zurückgewonnen werden ist nicht bekannt. Es wird hier davon ausgegangen, dass dieselben Rückgewinnung wie bei Rhodia vollzogen wird, da das Inputmaterial ähnlich ist.

Firmenname	Ga	Au	In	Co	Pd	Ag	Ta	Sn	Sb	SE	Y	La	Ce	Eu	Gd	Tb	Prozessart
Global Tungsten & Powders Corp. (GTP)										X	X			X		X	Hydrometallurgie
HydroWEEE		X	X			X				X	X						Elektrolyse
Shanghai Asahi Pretec Co., Ltd.		X			X	X											Elektrolyse

10.7.6 Darstellung Einzelverfahren

Die Pyrometallurgie und die Hydrometallurgie sind die weitaus bedeutendsten Verfahren. In Pilotanlagen und Forschungsprojekten werden jedoch auch andere Verfahrensprinzipien angewendet, z. B. biometallurgische Verfahren. Auf der Basis der Listen in den vorherigen Tabellen wurde eine Reihe von Prozessen ausgewählt, die im folgenden Kapitel näher beschrieben werden.

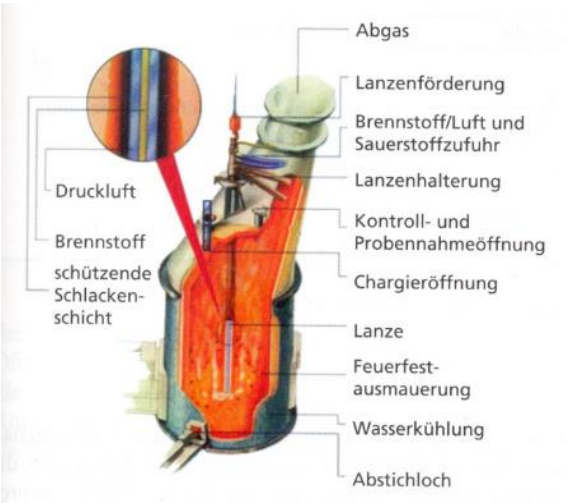
10.7.6.1 Pyrometallurgie zur Rückgewinnung von Metallen der Kupfer- bzw. Bleilinie

Die Inputmaterialien für pyrometallurgische Prozessesind komplexe elektrische und elektronische Produkte (z. B. Mobiltelefone) bzw. deren Komponenten (z. B. Leiterplatten, aber auch Schalter und Kontakte). Gewöhnlich wird Elektro(nik)schrott mit anderen Materialien vermischt.

Beispiele für pyrometallurgisch arbeitenden Anlagen sind Umicore in Hoboken, Belgien, und Aurubis mit den Standorten in Lünen und Hamburg[79].

Umicore und das Kayser Recycling System von Aurubis in Lünen nutzen einen ISA-Smelter (siehe folgende Abbildung). Umicore sowohl zum Einschmelzen von Elektro(nik)schrotten als auch zum Konvertieren und Aurubis zum Einschmelzen[80].

Abbildung 202: Prinzipbild eines ISA-Smelters



Quelle: Maurell-Lopez et al (2012)

10.7.6.1.1 Aurubis

Aurubis betreibt zwei pyrometallurgische Anlagen in Deutschland. In Hamburg erfolgt vorwiegend die Primärkupfererzeugung und in Lünen die Sekundärkupfererzeugung. Eine Übersicht über die jeweils an den Standorten eingesetzten Sekundärmaterialien zeigt folgende Abbildung:

[79] Auch im Standort Hamburg wird Elektroschrott z. B. in Form von Leiterplatten im Rahmen der Primärhütte eingesetzt.

[80] Für das Konvertieren hat die Anlage seit kurzem einen eigenen Konverter.

Abbildung 203: Beprobung, Vorbehandlung und Einsatz von Recycling-Materialien bei Aurubis

BEPROBUNG, VORBEHANDLUNG UND EINSATZ VON RECYCLING-MATERIALIEN			
	Legierungsschrotte, Metallbarren, Cu-Fe-Materialien, Shredder, Granulate	**Elektro- und Elektronikschrotte, Leiterplatten, Bauteile, auch granuliert, etc.**	**Rückstände, Aschen, Schlacken, Schlämme, Stäube, Industrierückstände etc.**
Probenahmeverfahren	Mischen, reduzieren, sägen, bohren, schmelzen	Mehrstufiges Zerkleinern und Teilen bis <1 mm, fein vermahlen und schmelzen	Zerkleinern und mahlen, mischen, reduzieren, Stechheber, mischen und teilen, schmelzen, Feinvermahlung
Analytik	Geräteanalytik, Nasschemie, Inhaltsbestimmung	Nasschemie	Geräteanalytik, Nasschemie
Vorbehandlung	Mischen, zerkleinern	Zerkleinerung bis ofengängig, mischen, agglomerieren, Separation von Fe, Al, Kunststoffen	Mischen, agglomerieren
Einsatz	KRS, Anodenofen	KRS, Konverter	KRS, E-Ofen

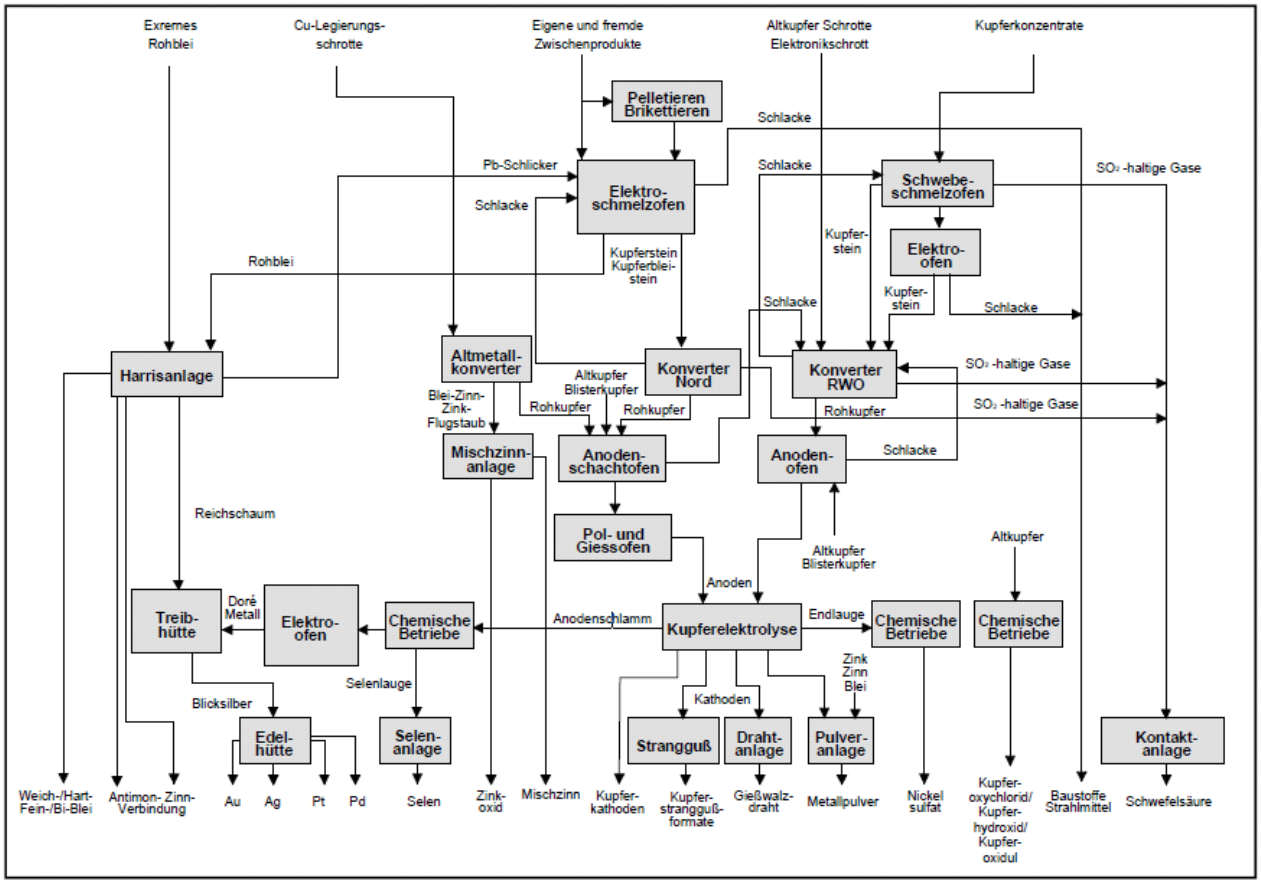
Quelle: Aurubis (2012a)

10.7.6.1.1.1 Standort Hamburg

In der Hamburger Anlage wird Elektroschrott in Form von Leiterplatten (10-12.000 t/a) eingesetzt. Zukünftig sollen ebenfalls am Standort in Bulgarien Leiterplatten verwertet werden.

Einen Überblick über die Prozesse am Standort Hamburg gibt folgende Abbildung:

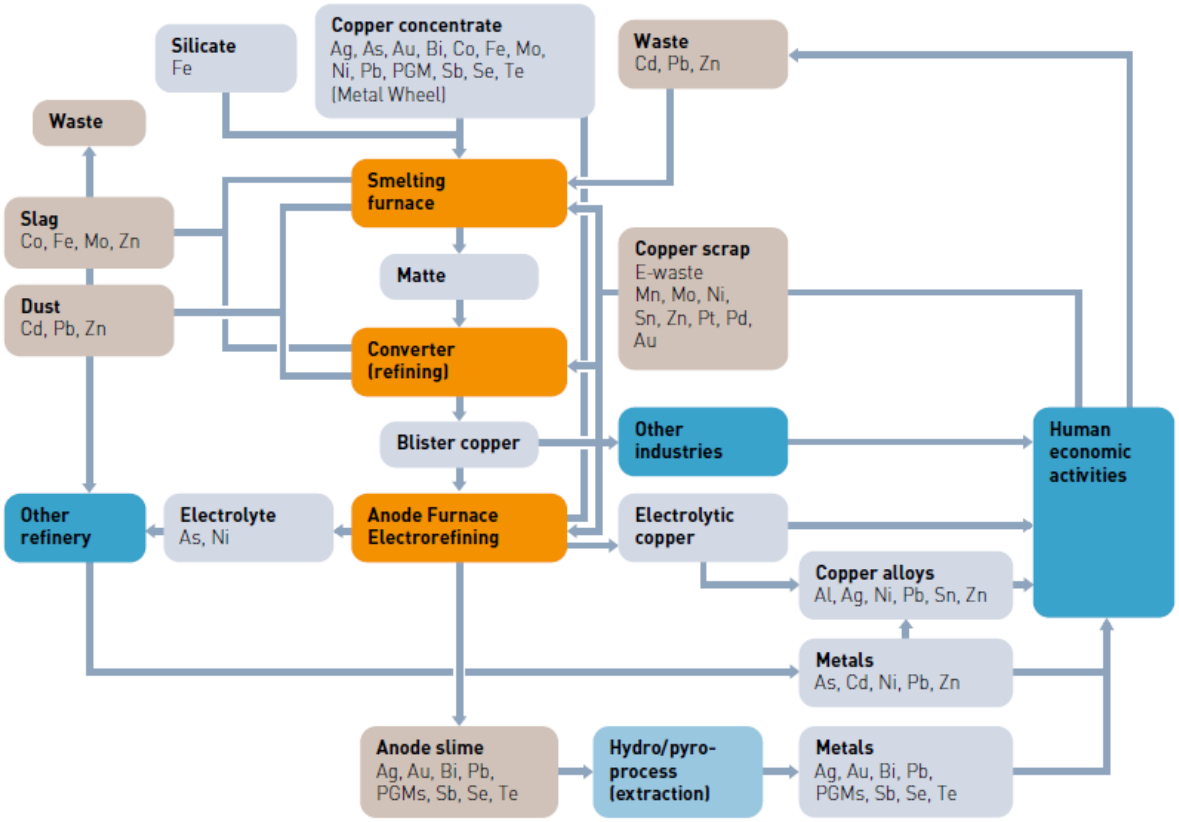
Abbildung 204: Prozesse der AURUBIS am Standort Hamburg



Quelle: Aurubis (2012a)

Die RePro-Elemente befinden sich nach einigen Prozessstufen (siehe auch Erläuterungen für den Standort Lünen) im Anodenschlamm, welcher anschließend aufbereitet wird Folgende Übersicht zeigt vereinfachend die Stoffströme in der Primärkupferproduktion beim Einsatz von Kupferkonzentraten und Kupferschrotten.

Abbildung 205: Stoffströme in der Primärkupferproduktion beim Einsatz von Kupferkonzentraten und Kupferschrotten



Quelle: Nakajima et al.,(2008); (2009); (2011); Nakamura und Nakajima, (2005); Nakamura et al. (2007)

10.7.6.1.1.2 Standort Lünen

Am Standort Lünen werden jährlich etwa 350.000 t Altmaterialien eingesetzt. Darunter ist Altkupfer, Kupferlegierungsschrott, Schreddermaterial, Rückstände, E-Schrott und Kupfereisenmaterial (30.000 t/a). Der extern vorbehandelte und entfrachtete E-Schrott wird zuerst bemustert. Bei Legierungen wird dies meist spektroskopisch durchgeführt. Proben werden aber auch eingeschmolzen.

Die Wertermittlung der angelieferten Materialien erfolgt nach Abschätzung der Kosten für die Bearbeitung, ihrer Zusammensetzung und anhand des jeweils aktuellen Kurses der Londoner Metallbörse. Dabei werden andere Metalle als Kupfer ab bestimmten Schwellenwerte vergütet, Gold ab 10 g/t und Silber ab 200 g/t[81].

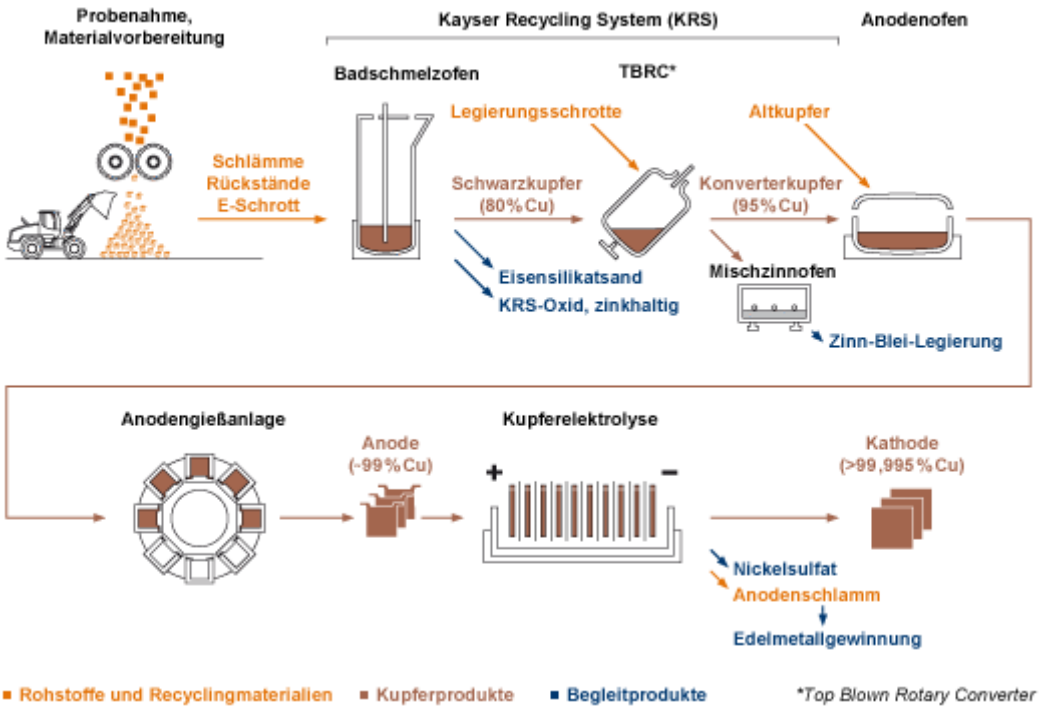
[81] Dabei ergeben sich unterschiedliche Preisstrukturen wenn Aurubis die Metalle selbst für seine eigenen Produkte zurückgewinnt oder wenn die Anlage für einen externen Kunden die Metallextraktion lediglich als Auftragsarbeit durchführt.

Der hauptsächlich am Standort Lünen eingesetzte E-Schrott besteht aus PC, Tastaturen, Druckern, Kopierern und Großrechnern. Monitore, Fernseher und Haushaltsgeräte werden nicht verwendet.

Die eingesetzten Schrotte werden zunächst geschreddert. Kunststoffe und Aluminium werden separiert und verkauft. Der restliche Schredderoutput wird in einem Badschmelzofen aufgeschmolzen.

Dabei wird der Ofen batchweise zuerst mit kupferarmen Einsatzstoffen chargiert und eingeschmolzen und z. B. Zinn in der entstehenden Schlacke angereichert. Andere Edelmetallen wie Silber, Gold und Palladium werden in die Kupferschmelze überführt und die Legierung auf etwa 80 % Kupferinhalt angereichert. Im darauf folgenden Aufblaskonverter (TBRC[82]) erfolgt eine weitere Anreicherung des Kupferinhaltes auf ca. 95 % sowie ein Abtrennen von Zinn und Blei. Die Zinn-Blei-Schlacke wird im unmittelbar angeschlossenen Mischzinnofen zu einer Zinn-Blei-Legierung verarbeitet (Aurubis 2012). Das so entstandene Konverterkupfer wird im Anodenofen von für die Herstellung von Anoden unerwünschten Gasen befreit und dann zu Anoden gegossen, die einen Kupfergehalt von 98,5 %-99 % haben. Sie werden dann in einem hydrometallurgischen Schritt in einem Elektrolysebad mit Schwefelsäure aufgelöst. Das gelöste Kupfer lagert sich an denen sich ebenfalls im Bad befindlichen Kathoden an. Die Edelmetalle sinken ab und werden als Elektrolyseschlamm gesammelt[83]. Dadurch erhalten die Kupferkathoden eine Reinheit von 99,99 % (Maurell-Lopez et al. 2012). Wertmetalle aus dem Schlamm werden i.d.R. unter Einbeziehung von hydrometallurgischen Schritten in Hamburg zurückgewonnen. Seltene Erden werden über die Schlacke ausgetragen.

Abbildung 206: Schematische Darstellung des Recyclingprozesses bei Aurubis



Quelle: Aurubis (2012)

[82]Top Blown Rotary Converter

[83]Der Elektrolyseschlamm wird am Standort Hamburg weiterverarbeitet.

10.7.6.1.2 Umicore

Ähnliche Prozessschritte mit einem ISA-Smelter und Kupferelektrolyse erfolgen bei Umicore.

Umicore setzt etwa 330.000 t verschiedene Materialien jährlich ein und extrahiert ca. 70.000 t Metalle.

Post-consumer-Abfälle machen etwa 30 % der Inputstoffe bei Umicore aus. Der restliche Input sind Sekundärmaterialien.

Leiterplatten werden zu 100 % beprobt. D. h, dass die gesamte Ladung durch einen Zerkleinerungsshredder in 4x4 cm große Stücke gebrochen wird. Ein Probenteiler unterteilt die Menge und separiert etwa jede 10. Rohprobe. Diese wird dann durch einen 2. Schredder in 7x7 mm große Proben zerkleinert, erneut geteilt und im Labor analysiert. Die Analysekosten belaufen sich auf 600-1.500 €/t. Weitere Kosten sind Einschmelzkosten die unabhängig von Metallgehalt des einzuschmelzenden Materials sind und Raffinationskosten die z. B. für Palladium 500 €/kg vergütetes Metall betragen.

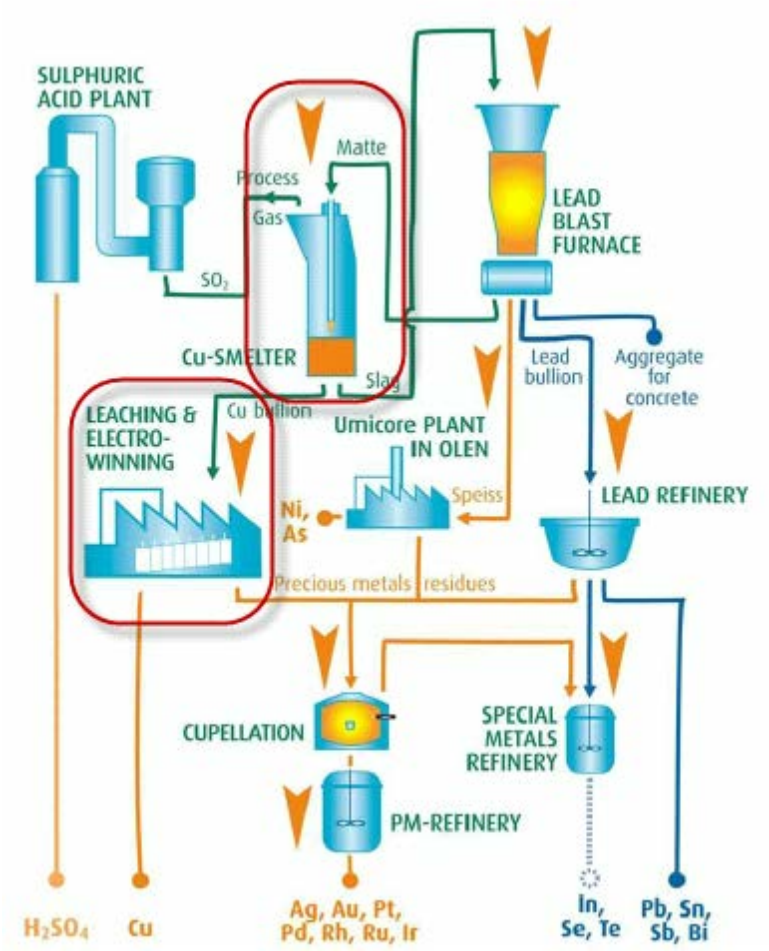
Über die vielstufige Prozesskette wird Indium zurückgewonnen, dabei wird die Rückgewinnungsquote nicht nur von Verlusten jeder einzelnen Stufe beeinflusst, sondern auch von der Indiumkonzentration in den Inputstoffen.

Umicore vergütet einige Bestandteile des Input ab einer Konzentration von 10 ppm (z. B. Ag, Au, Pd).

Umicore separiertetwa 50 % Antimon(trioxid)aus dem Input, welches dann in einer anderen Anlage weiter zu Antimon umgewandelt wird.

Die Rückgewinnung von Spezialmetallen kann teilweise als Mitnahmeeffekt bewertet werden. Sie durchlaufen mehrere Prozessschritte, die auch unabhängig von diesen Spezialmetallen erfolgen würden, bevor eine Abtrennung erfolgen kann (Hagelüken pers. com. 2012).

Abbildung 207: Fließbild des Umicore Prozesses (Hagelüken 2006)



Die Abbildung oben zeigt ebenfalls Details der Edelmetallgewinnung. Diese erfolgt im Zusammenhang mit folgenden Prozessen:

- Schmelzofen, ISA-Smelter,
- Hochofen für die im Schmelzofen entstehende oxidierte Bleischlacke,
- Bleiraffinerie u. a. zur Gewinnung von Blei- und Zinn,
- Laugung und Kupferelektrolyse,
- Spezialmetallveredlung zur Gewinnung von Indium, Selen und Tellur,
- Kuppellation[84] für den edelmetallhaltigen Anodenschlamm aus der Elektrolyse und
- Veredelungsstufe für Edelmetalle.

Die im Isa-Smelter oxidierte Bleischlacke wird in dem folgenden Hochofen mit Rohstoffen, die Blei in hohen Konzentrationen enthalten, versetzt und reduziert, sodass einerseits unreine Bleibarren gegossen werden können, sowie Nickel-Speiss, Kupfer und abgereicherte Schlacke entstehen. Das im Schmelzofen abgeschiedene Kupfer wird in einem Wasserbad in Kügelchen gegossen und dann elektrolytisch aufbereitet.

Die unreinen Bleibarren werden in der Bleiraffinerie (Harris-Prozess) weiterbehandelt. Dort entstehen neben Blei und Zinn, welche abgeschieden werden, auch spezielle metallhaltige Rückstände. Diese Rückstände werden dann mittels einer nicht näher beschriebenen Spezialmetallbehandlung zu reinen Metallen wie z. B. Indium veredelt.

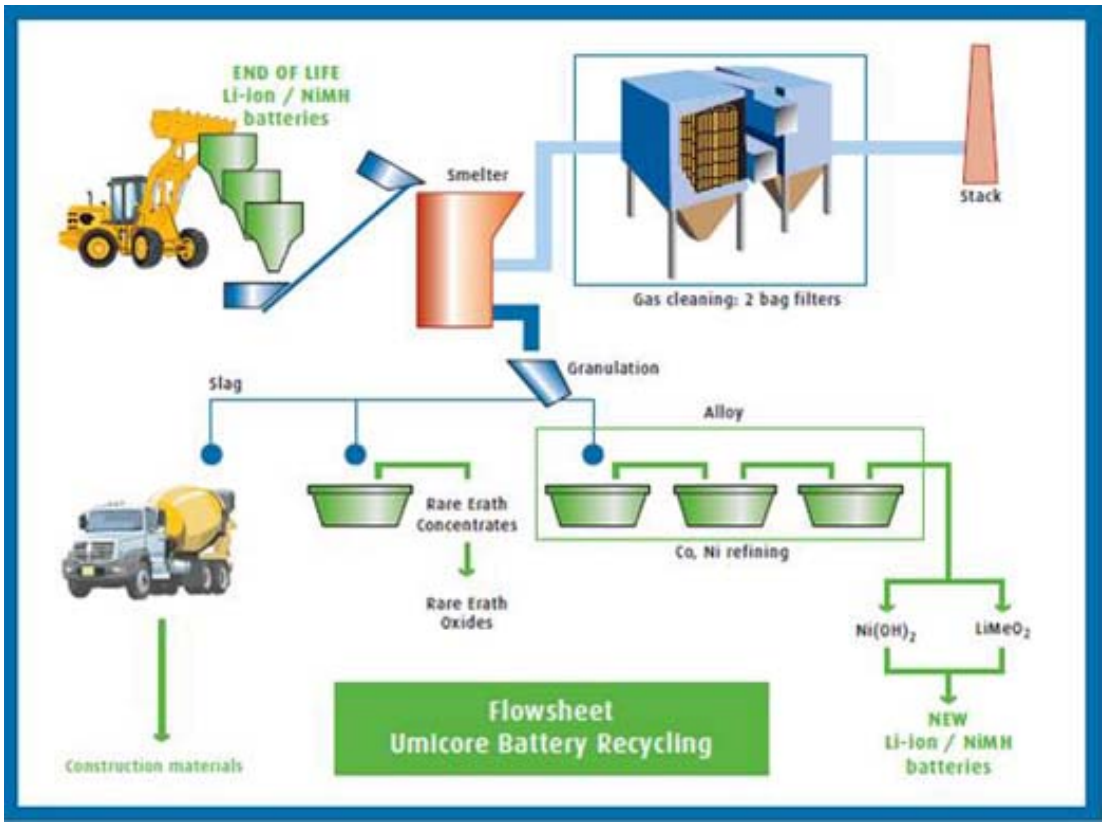
[84]Die Kupellation ist ein Verfahren zur Abtrennung von Edelmetallen aus Legierungen mit unedleren Metallen (z. B. Blei).

Der Nickel-Speiss wird zuerst in einer Anlage in Olen durch Auslaugung in Nickelsufat und Edelmetallrückstände getrennt. Die Rückstände werden durch Kuppelation und eine nicht näher beschriebene Veredlungsmethode u. a. in Silber, Gold und Palladium aufgetrennt.

Der Kupferstein wird wieder im Isa-Smelter eingesetzt und die abgereicherte Schlacke wird graduiert und entweder in der Zementindustrie oder als Deichverstärkung verwendet (Hagelüken 2006).

In der Anlage in Olen werden neben dem aus dem Hauptprozess entstehenden Nickel-Speiß auch Alt-Batterien eingesetzt. Hier werden durch das Einschmelzen der Batterien eine FeNi-CuCo-haltige Schmelze und eine SE-haltige Schlacke erzeugt (Luipold et al 2013).

Abbildung 208: Batterierecycling von Umicore in Olen



Quelle: Umicore (2013)

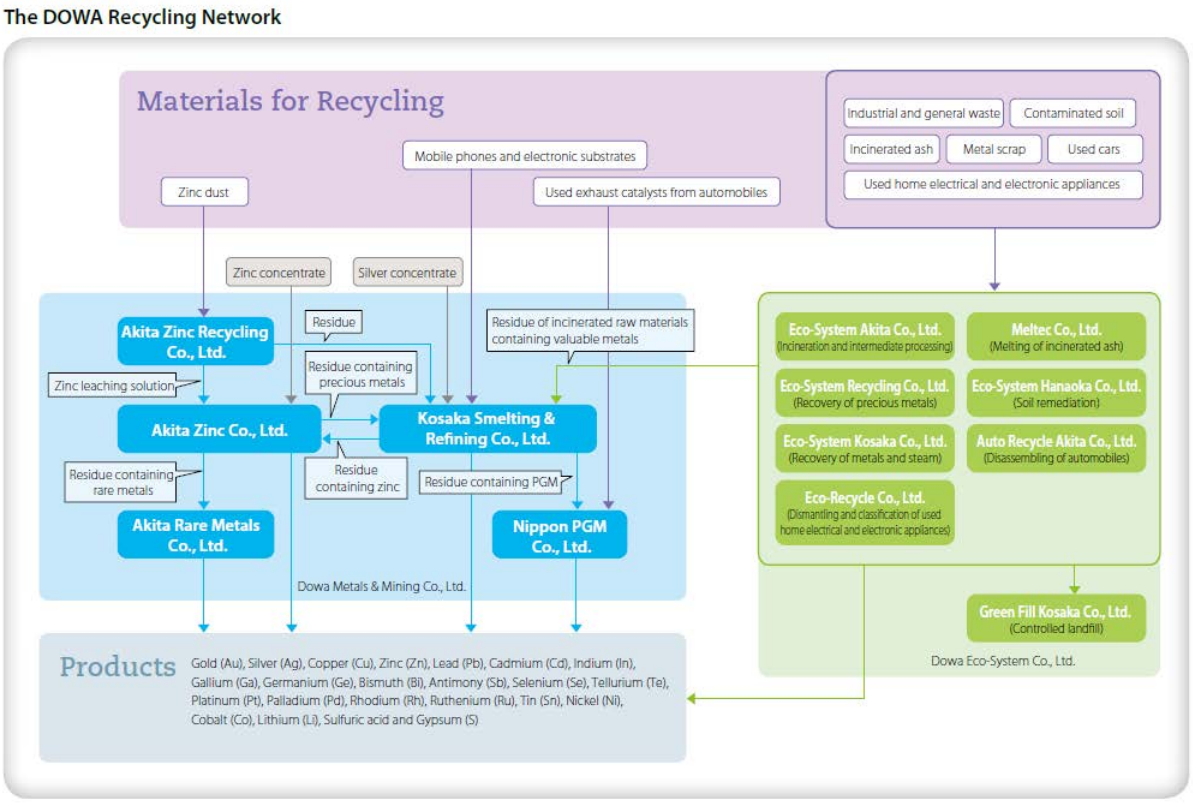
Durch ein speziell entwickeltes “Schlacke-System”[85] werden die Seltenen Erden aus NiMeH-Batterien so in der Schlacke gesammelt, der so weiterverarbeitet werden kann, dass Rhodia ihn als Seltenerd-Konzentrat in seinem Prozess in La Rochelle verwenden kann.

10.7.6.1.3 Dowa Gruppe

Die Dowa-Gruppe verfügt über ein Netzwerk an Anlagen in denen u. A. auch Elektronikschrott eingesetzt wird. Einen Überblick über die verschiedene In- und Outputstoffe sowie Anlagen gibt folgende Abbildung.

[85] Details dazu sind nicht bekannt.

Abbildung 209: Das Recycling-Netzwerk von Dowa[86]



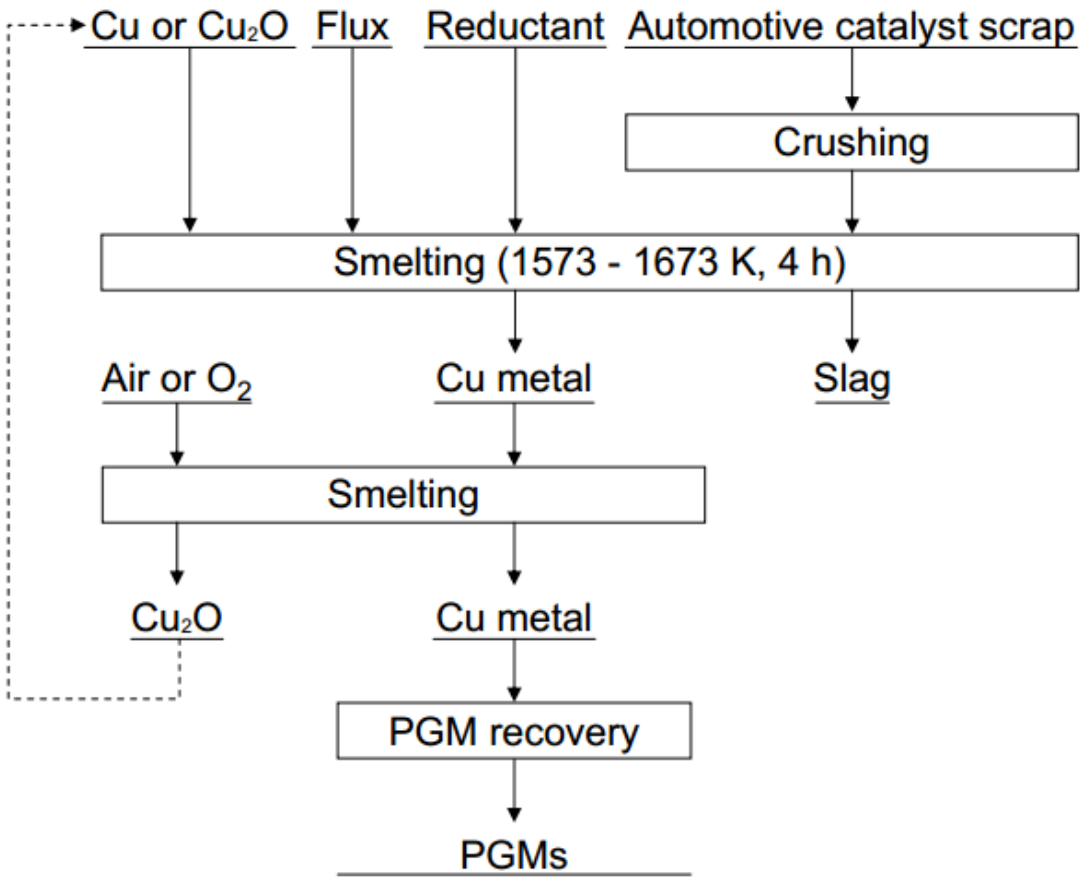
Quelle: Dowa (2011)

Zentrale Anlage ist die Kupferhütte in Kosaka in der laut (NYT 2010 und Dowa 2011) täglich 300 tonnen Computerchips, Lautsprecher von Mobiltelefonen, Mobiltelefone und andere zentrale Bauteile von gebrauchten Elektronikgeräten eingesetzt werden. Die Bauteile werden in zwei Zentimeter große Stücke zerkleinert und dann bei 1.400 C° eingeschmolzen bzw. verbrannt. Dadurch können 150 gr Seltene Erden zurückgewonnen werden (NYT 2010). Laut (Hayashi pers. comm 2013) werden die Elemente die durch die Anlage in Kosaka nicht zurückgewonnen werden können, an andere Anlagen der Dowa-Gruppe zur Rückgewinnung weitergereicht. Im folgenden werden die Anlagen basierend auf frei verfüglichen Informationen beschrieben.

Die Anlage der Nippon PGM Co. Ltd befindet neben den durch die Kupferhütte in Kosaka mit PGM angereicherte Resten auch direkt automobile und industrielle Katalysatoren auf. Sie verwendet dazu den Rose-Prozess (siehe folgende Abbildung 210), indem Kupfer oder Kupferoxide mit Autokatalysatorschrott eingeschmolzen werden (Horike & Okaba 2007, Tanaka 2013).

[86] In der Abbildung wird Kobalt ebenfalls als Zielmetall ausgewiesen. Dies wurde von Hayashi pers. comm (2013) jedoch nicht bestätigt.

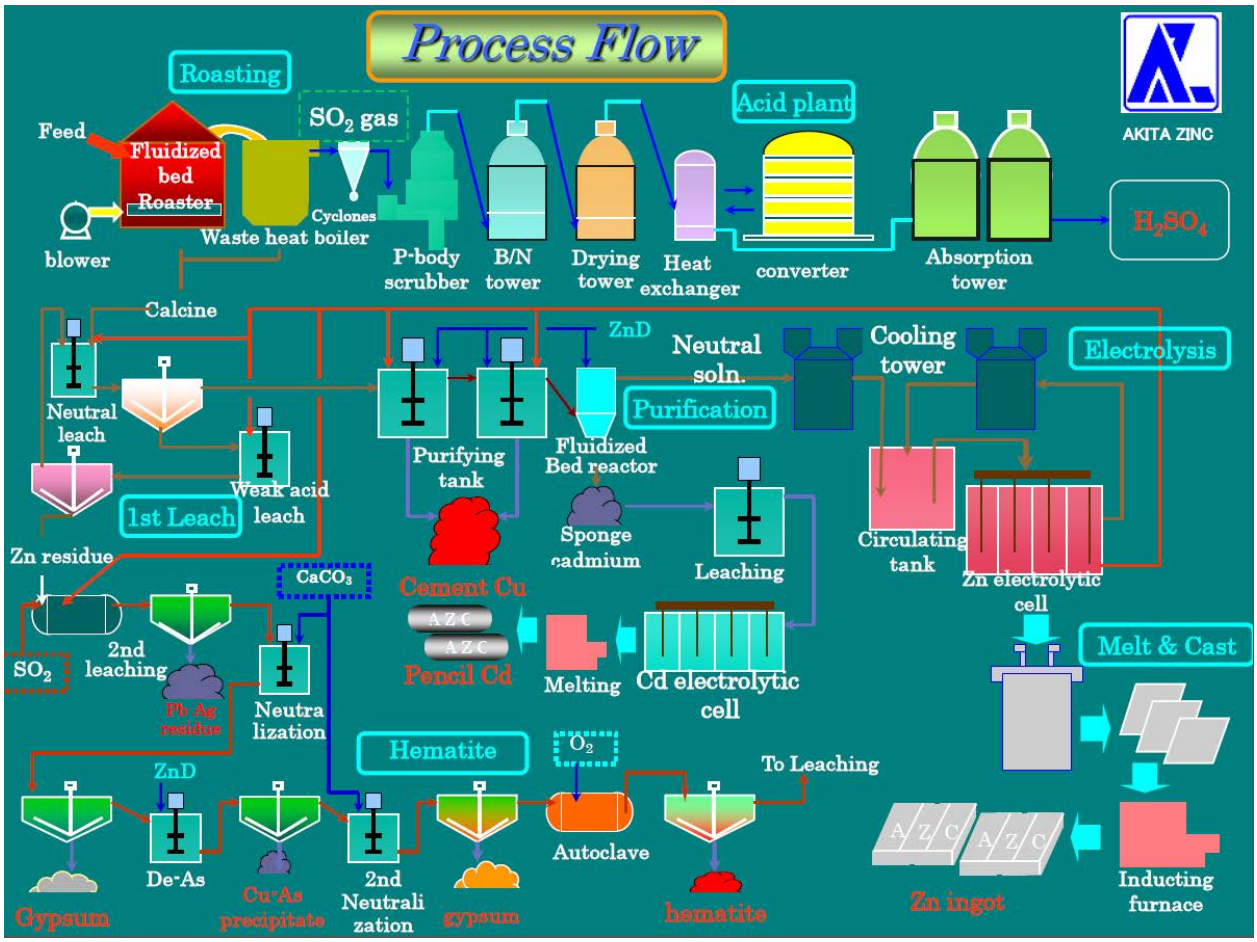
Abbildung 210: PGM Aufbereitung von gebrauchten Autokatalysatoren



Quelle: Horike & Okaba (2007)

Reststoffe, die Edelmetalle enthalten, werden in den Prozess der Akita Zinc Company in Akita eingeschleust (siehe folgende Abbildung)

Abbildung 211: Prozess der Akita Zinc Company

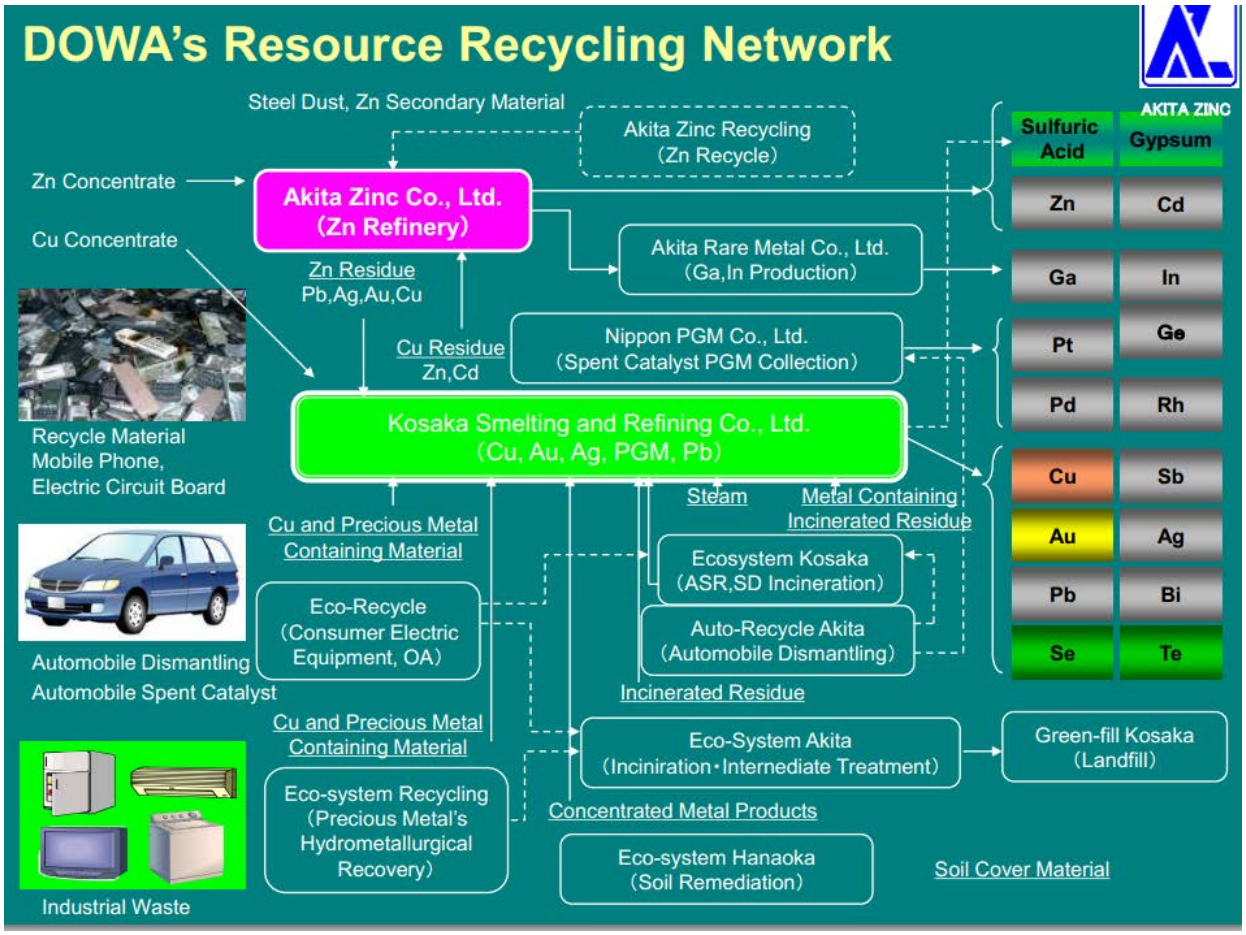


Quelle: Kudo (2011)

Die Reste, die noch immer seltene Metalle enthalten, werden weiter in der Anlage Akita Rare Metals Co. Ltd weiterbehandelt. Details zu dem Prozess sind nicht bekannt, lediglich, dass Gallium und Indium dort hergestellt werden.

Einen detaillierte Übersicht über die verschiedene Prozesse und deren Outputströme zeigt folgende Abbildung.

Abbildung 212: Recycling-Netzwerk der Dowa-Anlagen mit den jeweiligen Outputströmen

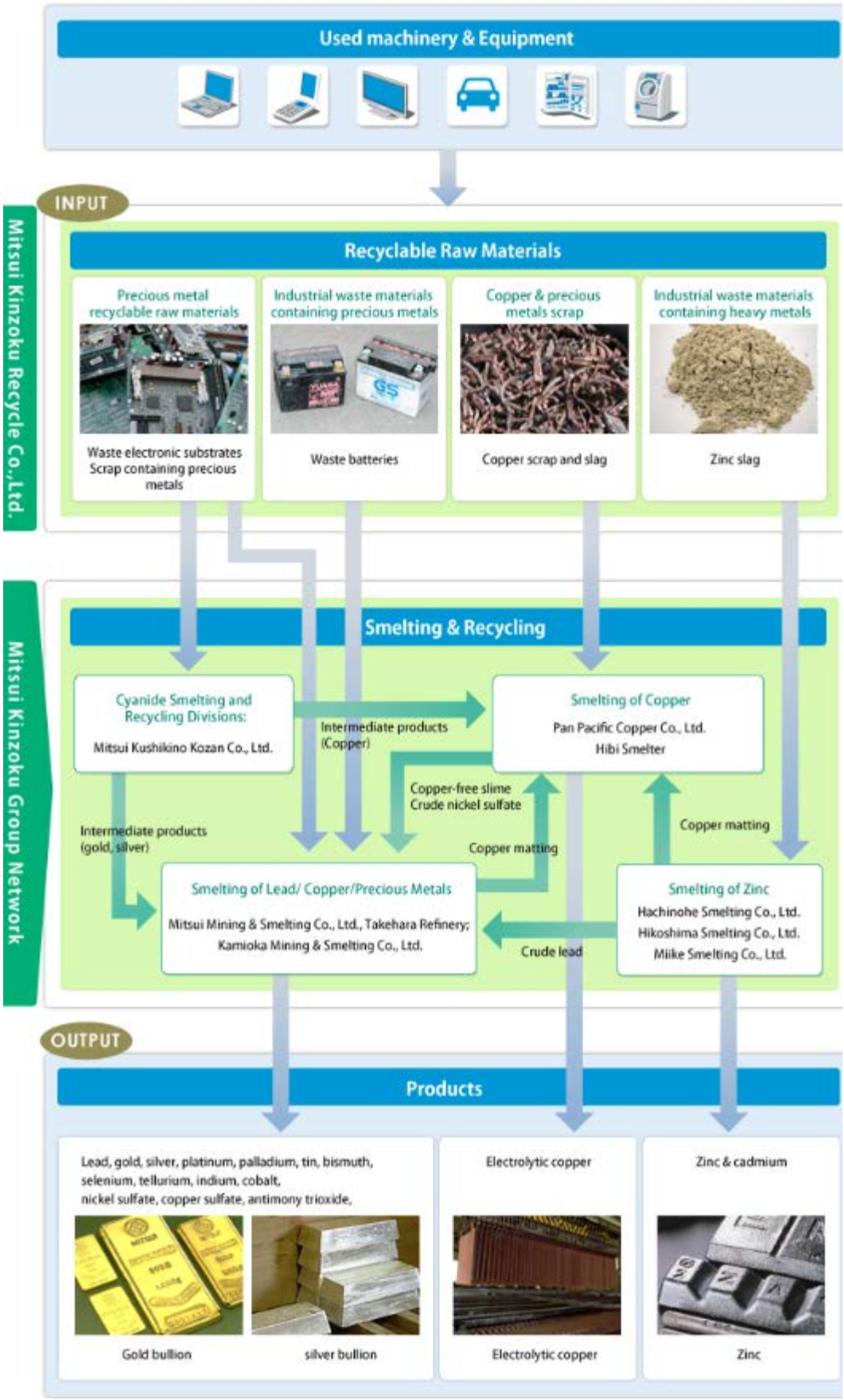


Quelle: Kudo (2011)

10.7.6.1.4 Mitsui-Gruppe

Ähnlich wie die Dowa-Gruppe besitzt auch die Mitsui-Gruppe unterschiedliche Firmen und Anlagen. EAG gehen laut Eigenaussage in die Anlagen der Mitsui Kushikino Kozan Co Ltd, Kamioka Mining & Smelting Co Ltd. Und Mitsui Mining & Smelting Co. Ltd. (siehe folgende Abbildung 213). Es handelt sich dabei um Anlagen die neben Cyanidlaugung, noch Zink-, Blei- und Kupferverhüttung anwenden. Kobalt wird aus Li_Ionen-Batterien zurückgewonnen (Japan Metal Bulletin 2008)Weitere Details zu den Prozessen sind nicht bekannt.

Abbildung 213: Mitsui Kinzoku Recycling Netzwerk

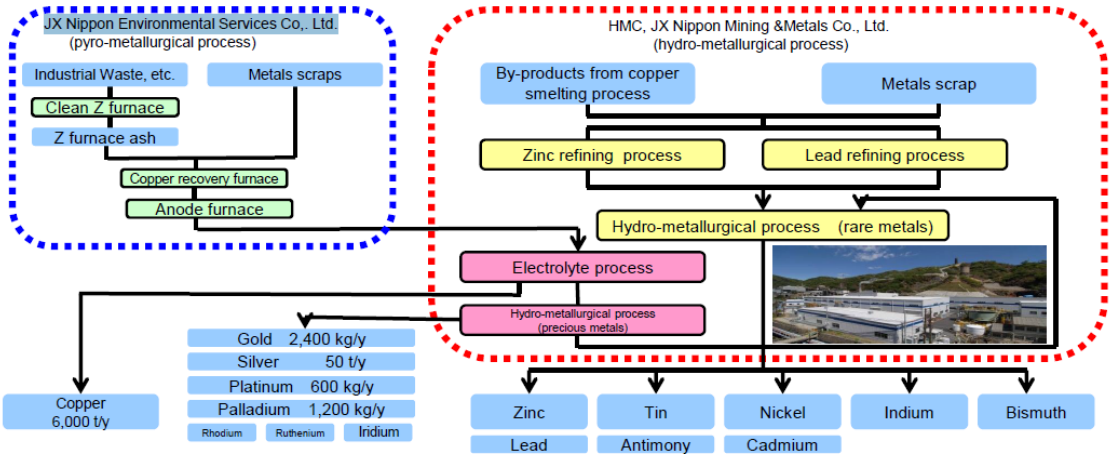


Quelle: Mitsui (2013)

10.7.6.1.5 JX Nippon Gruppe

Die JX Nippon Gruppe betreibt ein System welche von der Vorbehandlung bis zur Produktion neuer Materialien reicht. Abfälle wie Mobiltelefone, Leiterplatten, Li-Ionen Batterien, Steckverbindungen werden zunächst in der Anlage in Tsuruga zerkleinert bzw. pulverisiert und dann in einem Ofen verbrannt, verschlackt oder verascht. Dies Reststoffe werden über eine Sieb- und Rüttelmaschine geleitet, um die gold und silberhaltigen Anteile abzutrennen. Diese werden dann weiter an die Kupferhütte in Saganoseki weitergeleitet und zusammen mit Kupfererzen in Anoden gegossen (JX NMM 2012 & 2013). Im Hitachi Metals Recycling Complex in Hitachi werden einerseits die Anoden elektrolytisch aufgelöst und dann als Kathoden aufkonzentriert. Der übrigbleibende Anodenschlamm sowie Kupferschlacken werden per hydrometallurgischem Extraktionsverfahren in verschiedene Elemente aufgeteilt. Eine Übersicht über die Aktivitäten gibt folgende Abbildung.

Abbildung 214: Recyclingaktivitäten der JX Nippon Gruppe



Quelle: JX Holdings 2013

10.7.6.1.6 Montanwerke Brixlegg

Die Anlage nimmt momentan kaum postconsumer EAG an, weil sie zuviel Plastik, Aluminium und Chrom enthalten. Das gilt auch für Leiterplatten. Sie nehmen höchstens aufbereitete Fraktionen zurück. Abschläge gibt es nach Materialgruppen. Für bestimmte Heizwerte gibt es keine Abschläge.

Kupfer wird ab 10 % Gehalt vergütet, Silber ab 150 ppm und Gold ab 20 ppm (Pesl pers. comm 2013).

10.7.6.1.7 Vacuumschmelze GmbH

Die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Magneten in post-consumer Abfällen wird bisher bei der Vakuumschmelze nicht durchgeführt. Im Folgenden ist der Prozess der Primärmagnetherstellung dargestellt mit aktuellen Ansätzen, Sekundärrohstoffe in der Produktion einzusetzen.

Die Vacuumschmelze GmbH produziert u. a. aus Halbzeug in einem speziellen pyrometallurgischen Verfahren u. a. Magnetkerne, Weichmagnete und Dauermagnete. Kernelement des Verfahrens ist der Vakuumschmelzofen. In ihm wird das Halbzeug zuerst in einem „Vakuum erschmolzen und abgegossen, um Ni, Fe, Co und Cr Legierungen mit niedrigsten Gehalten an C,

N, O, H und nichtmetallischen Einschlüssen (Oxide, Nitride und Karbide) zu erzeugen. Induktive Erwärmung führt zu einer sehr homogenen Temperaturverteilung und gleichmäßiger Zusammensetzung. Die Raffinationswirkung des Vakuums wird durch eine zusätzliche Ar-Spülung der Schmelze ergänzt. Die hohe Reinheit und Homogenität verbunden mit kleinstmöglichen Toleranzen der chemischen Zusammensetzung sind Grundlage zur Produktion der VAC-Legierungen mit herausragenden weichmagnetischen und einzigartigen physikalischen Eigenschaften. Dies bildet auch das Fundament zur Herstellung hochwertiger Seltenen-Erd-Dauermagnete“(Vacuumschmelze 2012).

Nach der Abkühlung und Formgebung durch Pressen, werden die Formteile aus Neodym-Eisen-Bor (Nd-Fe-B) in Vakuum-Sinteröfen zu Magneten verdichtet. Nach dem Sintern wird durch Wärmebehandlungen das Gefüge hinsichtlich der magnetischen Eigenschaften optimiert und die Magneten gegen Korrosion beschichtet (Vacuumschmelze 2012).

Die Firma nimmt derzeit am Forschungsprojekt MORE – Motorrecycling teil, in dem die Verwertung von Altmagneten geprüft wird (Uni Erlangen 2012).Die Rolle der Vacuumschmelze in diesem Projekt ist die Beurteilung der Verwertbarkeit der im Rahmen dieses Projektes hergestellten Sekundärstoffe zur Magnetproduktion. Laut (Blanke, pers. Com. 2012) hat die Vacuumschmelzen früher auch alte Magnete angenommen, um sie in den Prozess einfließen zu lassen. Dies erforderte aber eine einzelne Prüfung der Magnete, um deren Eignung als Inputmaterial beurteilen zu können, was unter wirtschaftlichen Aspekten ineffizient war. Prozessmaterialien werden indes wieder rückgeführt. Die hauptsächlichen Gründe die dem Einsatz von Sekundärmagneten zur Primärmagneterzeugung entgegenstehen sind folgende:

die Rücklaufmengen sind in der Regel zu gering (< 100 kg), die Zusammensetzung der gelieferte Magnete ist nicht eindeutig genug[87],

es gibt noch kein Verfahren um die pulverisierten Magnete von den Anhaftungen (Antioxidationsbeschichtung) zu trennen (Blanke, pers.com. 2012).

Rückgewinnung von Seltenen Erden: Rhodia Gruppe

Rhodia verarbeitet in verschiedenen Anlagen drei post-consumer Abfälle. Die Verarbeitung dieser Abfälle erfolgt für

d) Gasentladungslampen an den Standorten Saint-Fons (FR) und La Rochelle (FR),
e) NiMH-Batterien in Kooperation mit Umicore in Hoboken (BE) und der Anlage in La Rochelle,
f) Magnete zusammen mit Aufbereitern von Elektroaltgeräten und der Anlage in La Rochelle[88].

10.7.6.2 Hydrometallurgie

10.7.6.2.1 Aufkonzentration in Saint-Fons

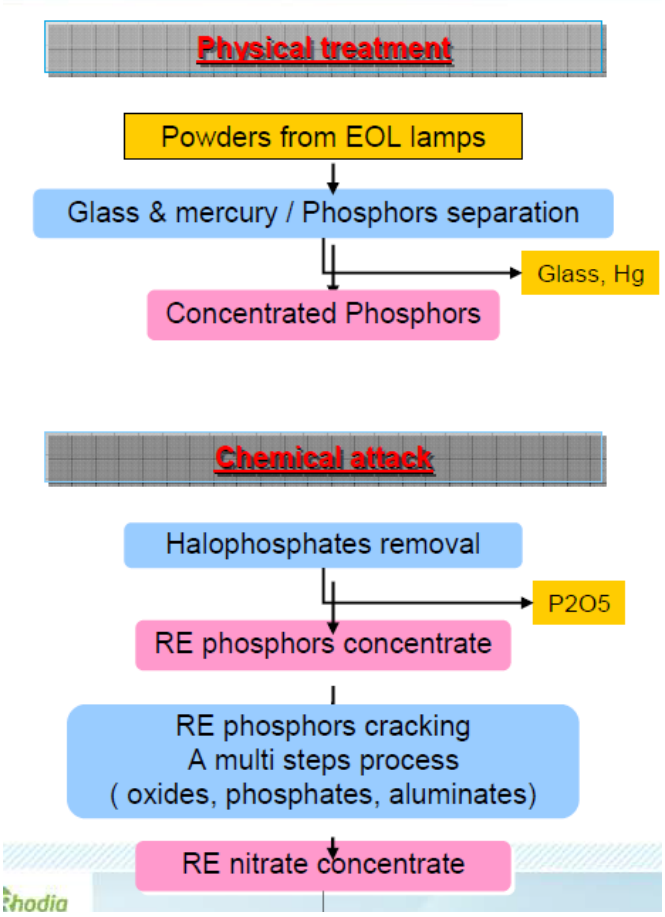
Über diesen Prozessschritt, der vornehmlich bei Leuchtschichten aus Gasentladungslampen und Bildschirmen angewendet wird, ist wenig publiziert und er wird laut (Recycling Magazin

[87]Beispielsweise ist nicht eindeutig, ob eisenhaltige Bestandteile dabei sind oder nicht.

[88]Gemäß (Rhodia pers. comm 2012) ist bei der Aufarbeitung von Magneten entscheidend, relevante Mengen zu erhalten. Der Rhodia-Prozess stellt keine spezifischen Anforderungen hinsichtlich der Beschichtungen der Magnete wie z. B. die Nickelbeschichtungen vorab zu entfernen). Es werden auch keine maximale Eisengehalte vorgegeben.

2012) auch geheim gehalten. Bekannt ist lediglich, dass das von Recyclern angelieferte Lampenpulver von Glasresten[89] und anderen Verunreinigungen getrennt wird, dann chemisch behandelt und einem Flüssig-Fest-Extraktionsverfahren unterzogen wird (Solvay 2013, Intecus pers. com. 2013). Output des Aufkonzentrationsschrittes von Energiesparlampen in Saint-Fons sind Phosphor, ein Seltene-Erden-Konzentrat und ein Endrückstand. Einen Überblick über das Verfahren gibt folgende Abbildung.

Abbildung 215: Aufbereitungsschritte des Gasentladungslampenpulvers von Rhodia in Saint Fons



Quelle: Rhodia (2013)

Das Seltene-Erden-Konzentrat wird nach diesem Prozess zur Anlage in La Rochelle gebracht.

10.7.6.2.2 Exktraktionsverfahren in La Rochelle

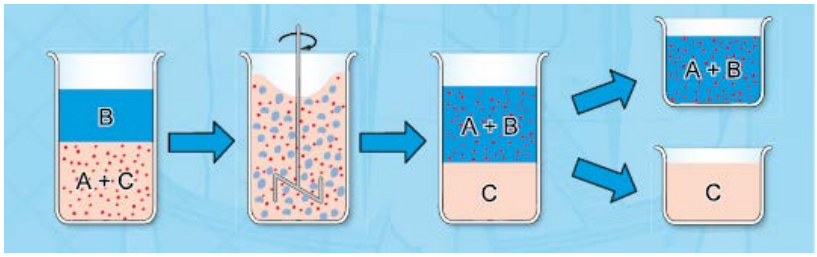
Das Seltene-Erden-Konzentrat wird in La Rochelle erst pyrometallurgisch behandelt. Danach wird der Leuchtstoff durch heiße Salpetersäure (oder Chlorwasserstoff) angegriffen (Intecus per.com. 2013, Solvay 2013), bevor es einem Flüssig-Flüssig-Extraktionsverfahren unterzogen wird (Solvay 2013, Recycling Magazin 2012, Rhodia 2012a). In diesem Verfahren werden ebenfalls Konzentrate aus der Behandlung von NiMH-Akkus, die in Umicores Ultra High Temperatur (UHT) Batterie Recycling Prozess hergestellt werBatterien, sowie Magnete zur Wiedergewinnung von Seltenen Erden eingesetzt.

Bei dem von Rhodia verwendeten Flüssig-Flüssig-Extraktionsverfahren (auch Lösemittelextraktion genannt), handelt es sich vermutlich um eine Gegenstromextraktorbatterie nach dem

[89] Lt. (Rhodia pers. comm. 2012) darf das angelieferte Pulver maximal 40% Glasreste enthalten.

Mischer-Absetzer-Prinzip[90]. Hier wird das Seltene-Erden-Konzentrat erst mit Wasser versetzt und dann in einem zweiten Schritt ein Lösemittel hinzugefügt, in dem sich die avisierten Seltenen Erden besser lösen als in Wasser. Für Cer werden z. B. Lösemittel wie Tributylphosphat (TBP) oder Neodecansäure eingesetzt (Rhodia 2012a). Nach intensiver Mischung des Wassers mit dem Lösemittel kommt es in einem dem Mischer folgenden Absetzbecken zu einer Phasentrennung der beiden Flüssigkeiten (verfahrensingenieur.de 2012, Recycling Magazin 2012). Nun befinden sich die Seltenen Erden in der Lösemittelphase und nicht mehr in der Wasserphase zusammen mit den nicht erwünschten Stoffen. Den Prozess im schematischen Überblick zeigt folgende Grafik.

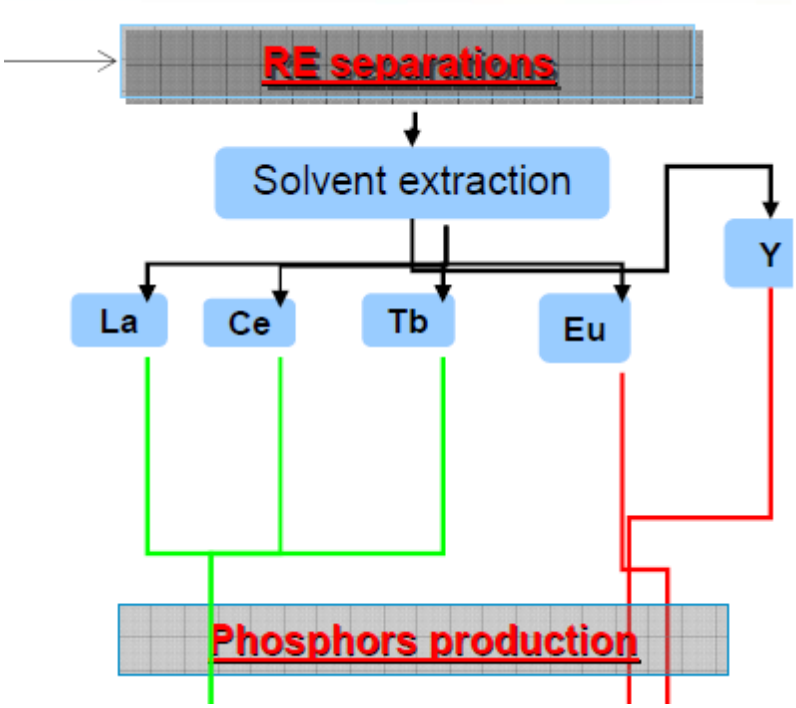
Abbildung 216: Schaubild einer idealisierten Flüssig-Flüssig-Extraktion mit Zielsubstanz A



Quelle: Gunt (2012)

Die Seltene(n) Erde(n) wird/werden dann aus der Lösung als Salz gefällt, getrocknet oder kalziniert und gemahlen.

Abbildung 217: Separation von seltenen Erden aus Gasentladungslampen in der Anlage von Rhodia in La Rochelle



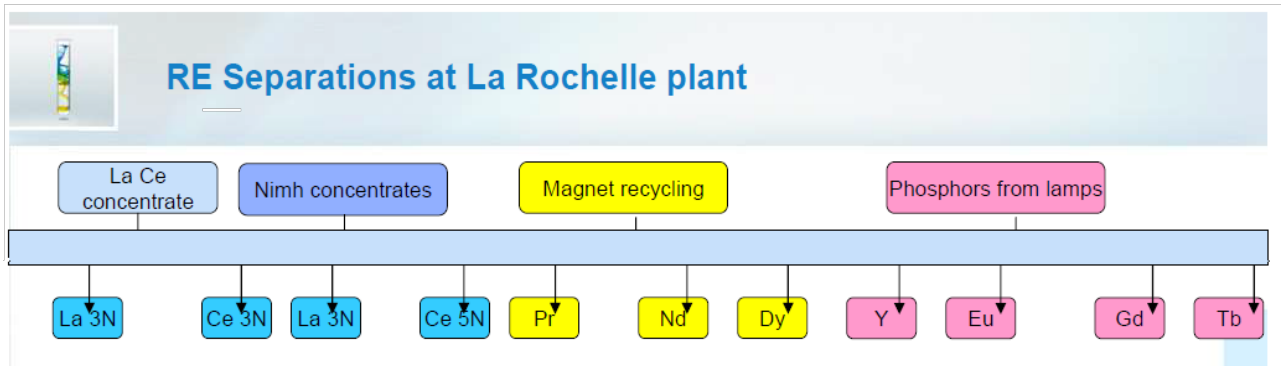
Quelle: Rhodia (2013)

[90]In La Rochelle sind 1500 Mischer-Absetzer installiert (Recycling Magazin 2012).

Detaillierte Prozessbeschreibungen von Rhodia findet sich unter (Rhodia 2012b). Einen Überblick über ein ähnliches von Osram patentiertes Verfahren findet sich ebenfalls im Anhang.

Laut (Rhodia 2013) werden Yttrium, Europium, Gadolinum, Terbium sowie verschiedene Cer- und Lanthanverbindungen durch den Prozess und LaRochelle extrahiert.

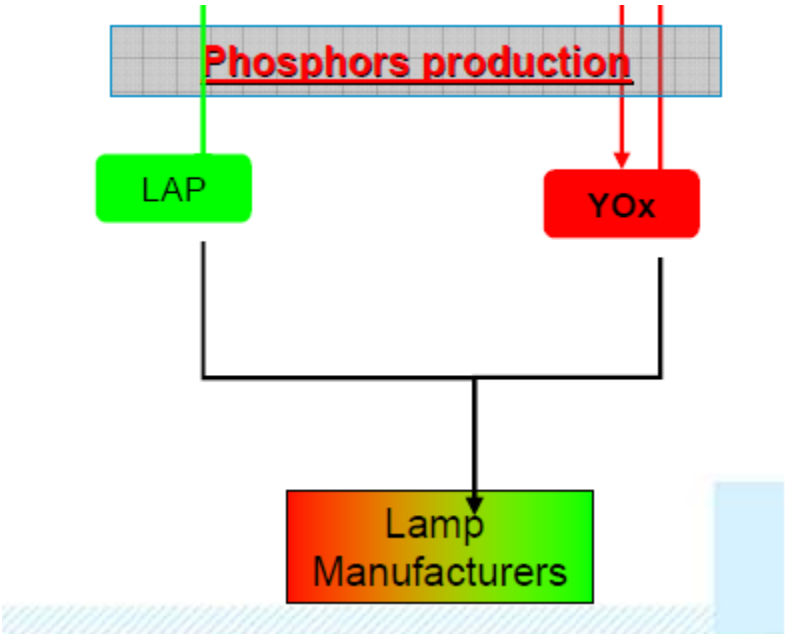
Abbildung 218: Separation von seltenen Erden in der Anlage von Rhodia in La Rochelle



Quelle: Rhodia (2013)

Aus diesem Prozess werden Lanthanphosphat (LAP) und Yttriumoxid (Yox) wieder für die Produktion neuer Energiesparlampen verfügbar gemacht (Rhodia 2013).

Abbildung 219: Produktion von seltenen Erden aus Gasentladungslampen für Produzenten von Gasentladungslampen in der Anlage von Rhodia in La Rochelle



Quelle: Rhodia (2013)

In NiMH-Batterien liegen unter anderem Cer, Lanthan, Neodym und Praseodym vor (Rhodia 2011).

Das Batterierecycling führt Rhodia zusammen mit Umicore durch, wobei Umicore ein Konzentrat an Seltenen Erden (hauptsächlich Lanthan, Praesodym, Neodym) zur Weiterverarbeitung an Rhodia übergibt (Hagelüken pers.com. 2012).

Laut (Rhodia 2013) wird aus Magneten Neodym, Praseodym und Dysprosium zurückgewonnen.

Laut (Walter 2011) werden 95 % der im Phosphorpuder aus Gasentladungslampen enthaltenen Seltenen Erden durch den Prozess recycelt.

Für alle drei Inputstoffe liegt die Rückgewinnungseffizienz zwischen 90-95 %.

10.7.6.2.3 Rückgewinnung von Tantal: H.C. Starck

Die Firma H.C. Starck produziert Metall-Konzentrate, Gußblöcke und Tantaloxide (H.C. Starck 2009). Die Firma setzt neben Schlacken und Erzen auch tantalhaltige Schrotte ein. Bei den Schrotten handelt es sich jedoch entweder um Produktionsabfälle, Fehlchargen oder gebrauchte Teile aus industriellen Anwendungen. Die einsetzten Schrotte sind z. B.:

- Fehlchargen und Produktionsabfälle von Kondensatorherstellern,
- Anwendungen aus dem Anlagenbau (alte Wärmetauscher, Reaktoren, Teile für Hochtemperaturöfen, Sputtertargets[91]),
- Ta-Kondensate die beim Schmelzen von Ta-Ingots z. B. in Plasmaöfen entstehen,
- Overspray in den physikalischen Gasphasenabscheidungsanlagen[92] der Halbleitertechnik,
- Gebrauchte Turbinenschaufeln,
- Ta-Oxide in Gläsern,
- $LiTaO_3$ Einkristalle für Akustische-Oberflächenwellen-Filter[93].

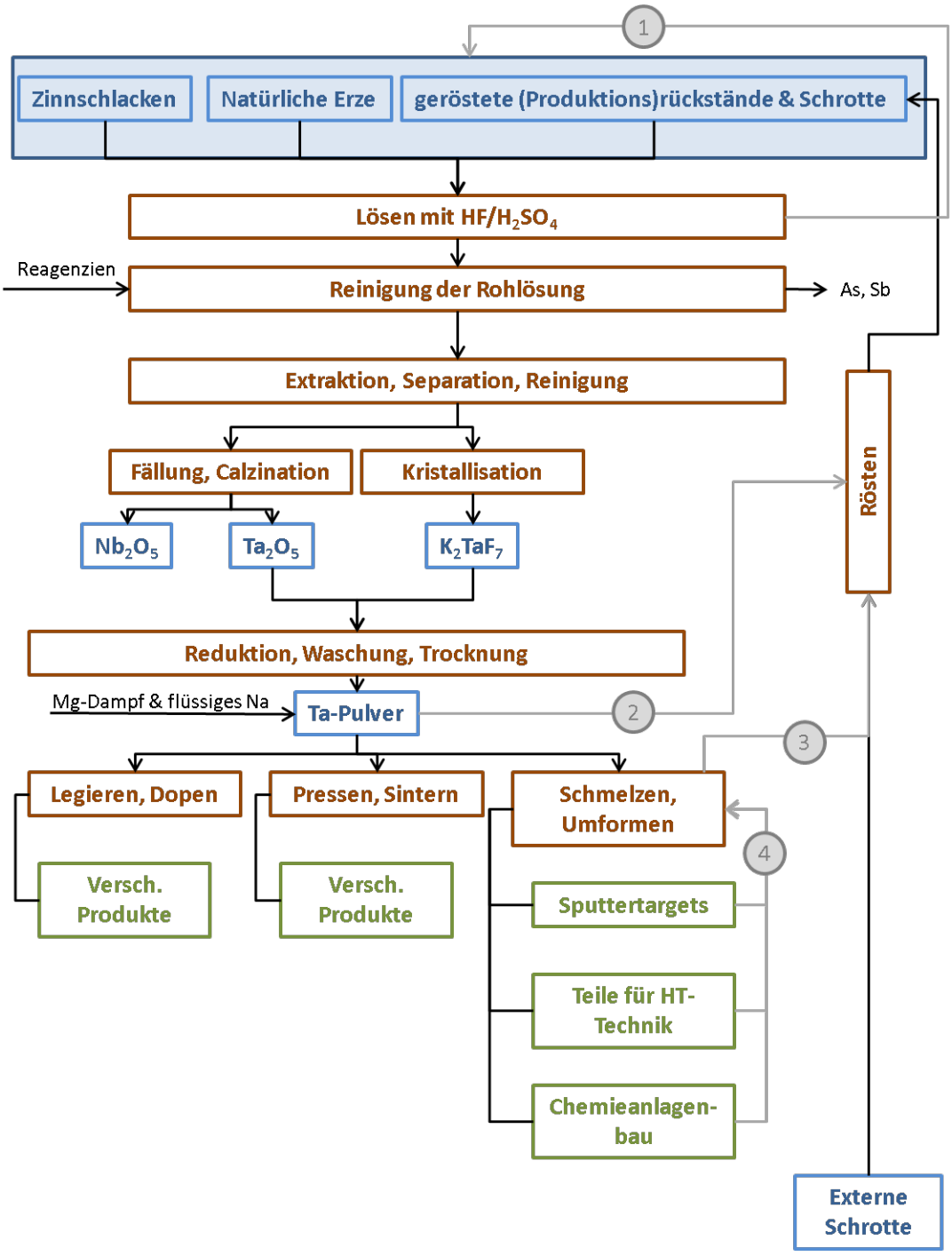
Tantal wird durch Flusssäure (HF) oder ein Gemisch aus HF und Schwefelsäure aus den Schlacken, Erzen und Schrotten herausgelöst. Hier werden hauptsächlich Arsen, Bismut und Antimon abgetrennt. Dann erfolgt eine Trennung von Niob und Tantal mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion. Das Extraktionsmittel ist in der Regel ein Keton wie z. B. Methylisobutylketon (MIBK). Nach der Reextraktion aus der organischen Phase werden entweder Oxide gefällt oder Kaliumtantalfluorid (K2TaF7) kristallisiert. Das Tantal-Kondensatorpulver wird durch Reduktion, Waschung und Trocknung der Oxide oder des K2TaF7 hergestellt und dann zu Endprodukten weiterverarbeitet (siehe folgende Abbildung 220).

[91] Hierbei handelt es sich um zerstäubte Kathoden aus der Halbleiterindustrie.

[92] Auch PVD-Anlagen (Physical vapor deposition) genannt.

[93] Auch SAW-Filter (Surface Acoustic Wave) genannt. Das sind Zwischenfrequenzfilter in Funkempfangsgeräten wie z. B. Mobiltelefone, Sprechfunk, Fernsehempfänger, Satellitenempfänger und Videorekorder (Wikipedia 2012).

Abbildung 220: Tantal/Niob-Hydrometallurgie bei H.C. Starck von den Rohstoffen über die Oxide und dasK2TaF7 bis zu den Endprodukten

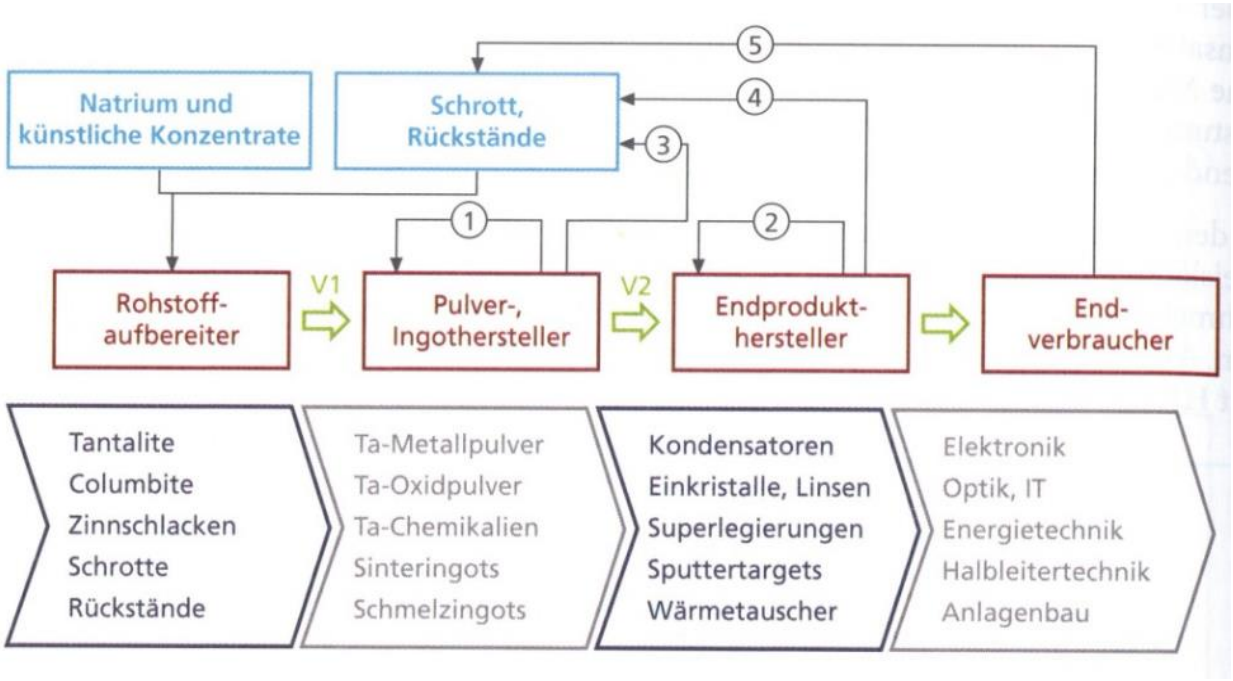


Quelle: basierend auf Gille und Meier 2012 verändert durch Ökopol

Die Zahlen und hellgrauen Verbindungen in obiger Abbildung bezeichnen die internen Materialkreisläufe.

(Gille und Meier 2012) haben Abschätzungen über die Materialflüsse sowie Verlustmengen grafisch dargestellt (siehe Abbildung 221).

Abbildung 221: Interne und externe Materialflüsse für Tantal



Quelle: Gille und Meier (2012)

Danach ergeben sich Ta-Verluste 2-4 % bei V1 sowie 5-8 % bei V2. Die internen Materialkreisläufe sind mit den Ziffern 1-5 in obiger Abbildung 221 angegeben.

Laut Gille und Meier (2012) könnte das Ta-Recycling vor allem über ein Recycling von Ta-Kondensatoren in elektronischen Geräten erhöht werden, was bisher jedoch durch die hohen Kosten für die Separierung der Kondensatoren verhindert wird.

10.7.6.2.4 HydroWEEE

Die Pilotanlage HydroWEE ist durch ihre Unterbringung in einem Seecontainer mobil und so an verschiedenen Standorten einsetzbar. Die Anlage hat im Pilotbetrieb bereits nach Aussage des leitenden Institutes SAT[94]:

- Yttrium aus der Leuchtschicht von Kathodenstrahlröhren,
- Indium aus LCD-Bildschirmen,
- Lithium aus Lithium-Ionen Batterien sowie u. A.
- Gold und Silber aus Leiterplatten

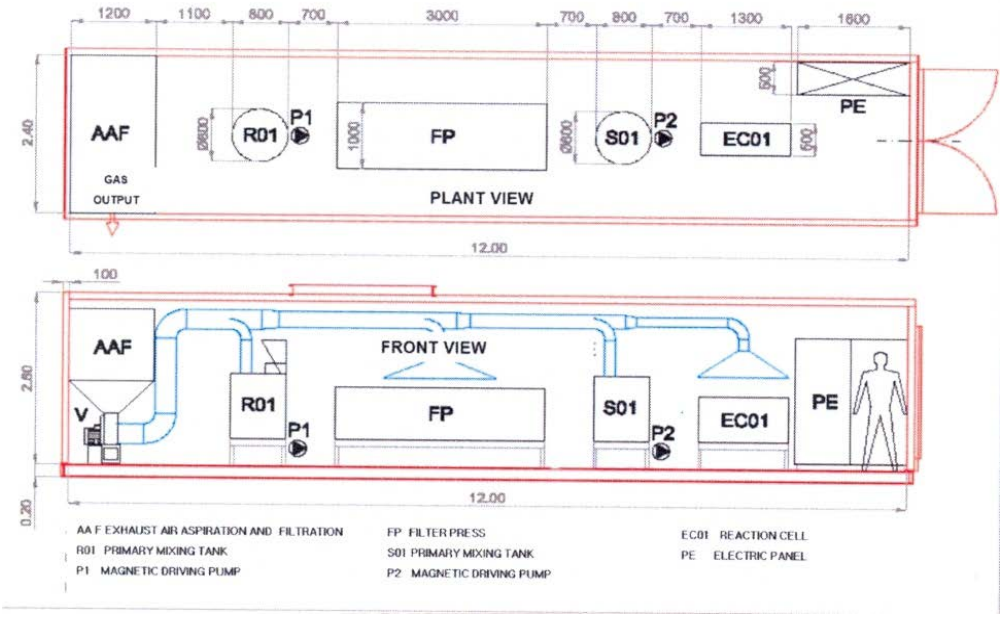
extrahiert (Kuhn 2012).

Yttrium und Indium sollen dabei mit einer Reinheit von mehr als 95 % produziert worden sein (HydroWEEE 2011).

Welche Chemikalien genau angewendet werden, um die Metalle zu lösen, ist nicht klar. Vermutlich kann die Anlage eine Reihe von Verfahren anwenden (Kuhn 2012). Einen Übersicht über die einzelne Prozessschritte gibt folgende Abbildung.

[94]Austrian Society for Systems Engineering and Automation

Abbildung 222: HydroWEEE-Prozessschritte



Quelle: Kopacek (2013)

10.7.6.2.5 Rückgewinnung von Seltenen Erden und Kobalt: Treibacher AG

Die Treibacher AG produziert in Österreich u. a die Seltenerdmetalle Lanthan, Yttrium, Cer, Gadolinium, Neodym, Dysprosium, Mischmetalle, die als Hauptkomponenten Lanthan, Neodym und Praseodym enthalten, sowie Kobalt (Treibacher 2012).

„Die Anlage ist unterteilt in die Bereiche SE I und SE II. Es gibt mehrere untereinander über Zwischenprodukte verbundene Produktionslinien. Aus SE-Konzentraten bzw. SE-Salzen werden SE-Salzlösungen hergestellt, indem die Rohmaterialien in Rührwerkskesseln in Mineralsäuren gelöst werden.

Kristalline SE-Salze (Nitrate, Oxalate, Sulfate, Chloride) werden entweder durch Ausfällung aus Salzlösungen mit verschiedenen chemischen Methoden in Rührkesseln hergestellt oder die Ausgangsstoffe werden in einer Kristallsalzapparatur in Kesseln nacheinander gelöst, eingedampft und kristallisiert. Anschließend erfolgt die Feststoffabtrennung entweder mit Zentrifugen oder Filteranlagen. Zur Herstellung von SE-Oxiden (gemischte oder hochreine Ce-, La- oder Y-Oxide) wird z. T. intern produzierte hochreine SE-Salzösung über Zwischenschritte zum Endprodukt in Glühöfen thermisch zersetzt und anschließend durch Sieben, Mahlen und Klassieren aufbereitet“(UBA GmbH 2004).

In der Anlage werden keine post consumer Abfälle und Elektronikaltgeräte eingesetzt. Das Unternehmen möchte aber langfristig das Recycling seltenerdhaltiger Materialien als Geschäftszweig aufbauen und führt zu diesem Zweck eine Reihe von Studien durch. Besonders interessieren sie seltenerdhaltige Magnete z. B. aus Festplatten. Problematisch ist hier laut dem Unternehmen allerdings die Sicherung genügend großer Stoffströme, damit das Recycling wirtschaftlich sinnvoll durchführbar ist. Weiterhin gestaltete es sich wohl bisher schwierig, einen Partner zu finden, der eine automatisierte Abtrennung der Magneten aus Elektronikgeräten anbietet. Grundsätzlich hat das Unternehmen Interesse an vorabgetrennten Stoffströmen aus Elektronikaltgeräten (Oberleitner pers.com. 2012).

10.8 Anhänge zum Bereich „Kommunikation“

Exemplarische Kommunikationskampagnen zur Sammlung von Elektroaltgeräten

Abbildung 223: Analyse & Kampagnen Umweltprofis Österreich, „Wegwerfen gefährdet unsere Umwelt“, Altstoffsammlung in Österreich 2010, Umweltprofis Österreich, www.ooe-bav.at/start.html



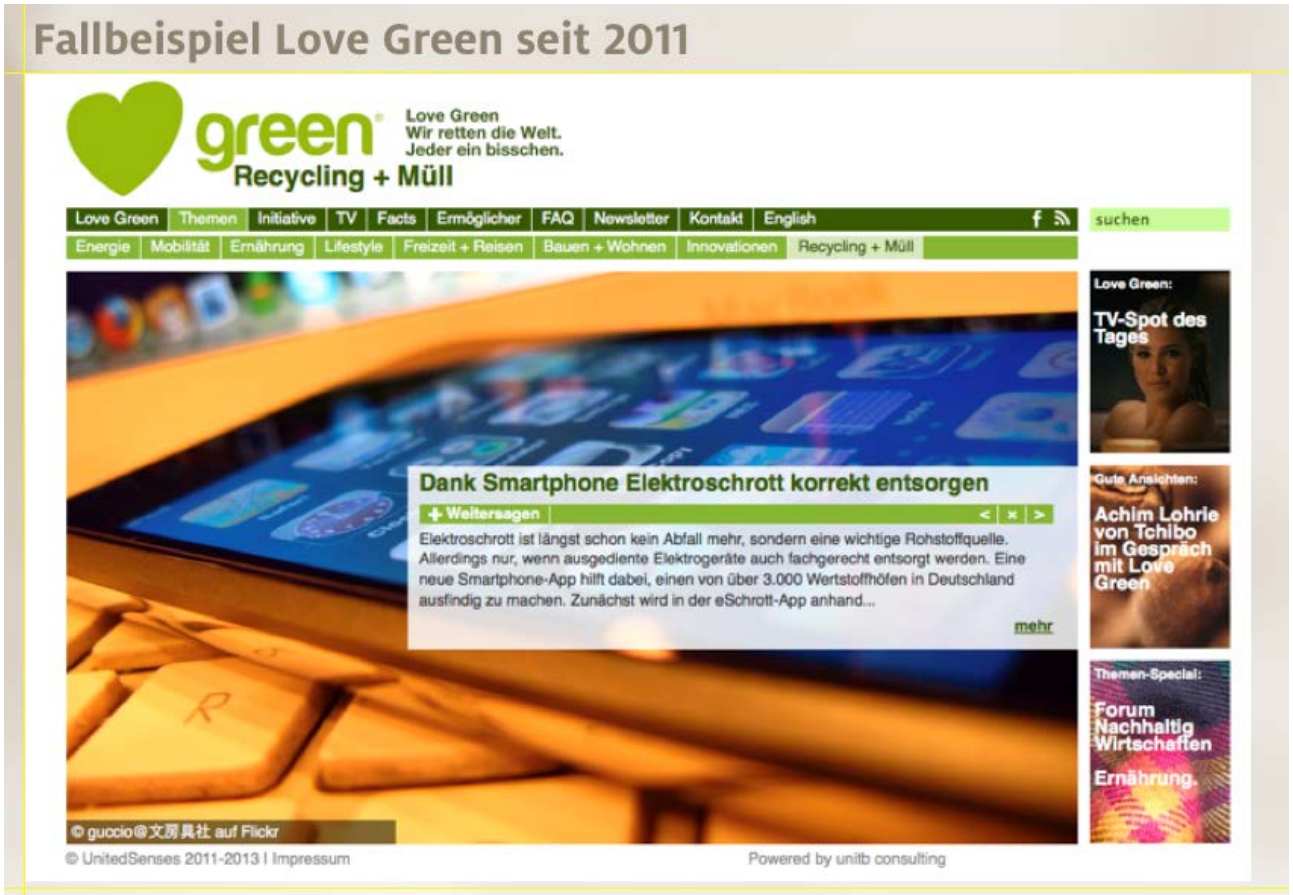
Quelle: Oberösterreich (2010)

Abbildung 224: Analyse & Kampagnen Umweltgerechte Entsorgung Wien „Helle Birnen entsorgen richtig



Quelle: Wien (2011)

Abbildung 225: Analyse & Kampagnen Love Green „love green“, Erste deutschlandweite Medieninitiative zum Thema Nachhaltigkeit, www.love-green.de, 2011



Quelle: Love Green (2011)

Mustermotive zum Aktionsmotto „Deutschland trennt sich“

Abbildung 226: Mustermotiv Föhn zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 227: Mustermotiv Monitor zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 228: Mustermotiv Telefon zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 229: Mustermotiv Toaster zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 230: Mustermotiv Fernseher zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 231: Mustermotiv Wäschetrockner zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014

Abbildung 232: Mustermotiv Lampe zu “Deutschland trennt sich”, Entwurf/Layout, Stand 28.04.2014



Quelle und copyright: Heymann Brandt de Gelmini 2014