

TEXTE

148/2020

# Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforde- rungen nach ElektroG

Bericht



TEXTE 148/2020

# **Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG**

Von

Dr. Sina Kummer, Axel Strobelt, Regina Kohlmeyer,  
Christian Kitazume, Dr. Ines Oehme, Christiane Schnepel,  
Umweltbundesamt, Fachgebiet III 1.6  
Dessau-Roßlau

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

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

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

### Durchführung der Studie:

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau

### Abschlussdatum:

Fachlicher Abschluss: Juli 2018. Redaktioneller Abschluss: März 2020

### Redaktion:

Fachgebiet III1.6 - Produktverantwortung  
Kerim Zaidi; Canan Süßenbach

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2020

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

## **Kurzbeschreibung: Empfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG**

Das novellierte Elektro- und Elektronikgerätegesetz (kurz: ElektroG) enthält in § 24 Nr. 2 eine Ermächtigungsgrundlage für die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung weitergehende Anforderungen an die Behandlung von Elektroaltgeräten (EAG), einschließlich der Verwertung und des Recyclings, über eine sogenannte Behandlungsverordnung (BehandV) festzulegen. Dazu wurden vom Umweltbundesamt gemeinsam mit einem Arbeitskreis und unter Einbindung relevanter Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verbänden und Behörden in mehreren Arbeitsgruppen weitergehende Empfehlungen für mögliche Behandlungsanforderungen an EAG entwickelt, diskutiert und bewertet. Dabei wurden neben Umweltwirkungen auch ökonomische Aspekte betrachtet.

Die in diesem Bericht vom Umweltbundesamt vorgeschlagenen Behandlungsanforderungen konkretisieren und aktualisieren die Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung gemäß § 20 ElektroG i. V. m. Anlage 4 und berücksichtigen zusätzlich Aspekte des Ressourcenschutzes. Es werden 57 geräte- und bauteilspezifische Behandlungsanforderungen für die Gerätegruppen der Bildschirmgeräte und Photovoltaikmodule, die Materialgruppen Kunststoffe und edel-/sondermetallhaltige Bauteile sowie über das ElektroG hinausgehende Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung empfohlen. In Kombination miteinander können diese eine umfassende Schadstoffentfrachtung und Ressourcenschonung verknüpfen. Das Umweltbundesamt schlägt außerdem die Verpflichtung zur Erstellung eines Behandlungskonzepts für die Erstbehandlungsanlagen in einer möglichen Behandlungsverordnung sowie Vorgaben der Zertifizierung im Rahmen des Monitorings vor. Des Weiteren wurde für die Erstellung der Behandlungsanforderungen die CENELEC-Normenserie 50625, unter dem Mandat M/518 der Europäischen Kommission, ausgewertet und in den empfohlenen Anforderungen berücksichtigt und bewertet.

### **Abstract: Title**

According to § 24 of the revised Electrical and Electronic Equipment Act (ElektroG), the German Federal Government is authorized to issue a statutory ordinance mandating further requirements for the treatment of waste electrical and electronic equipment (WEEE). This Treatment Ordinance (so called "BehandV") may set requirements for the treatment, recovery and recycling of WEEE. In a committee with representatives of industry, science, civil society and authorities, the German Environment Agency (UBA) developed recommendations for additional treatment requirements for WEEE. Besides environmental impacts also economical aspects have been considered.

The recommended treatment requirements specify and update the requirements for depollution set out in § 20 in conjunction with Annex 4 of ElektroG and, additionally, consider aspects of resource preservation. 57 device- and component-specific treatment requirements address the treatment of screens and photovoltaic panels, plastics, devices containing precious and special metals, and include depollution obligations going beyond the requirements of ElektroG. The interplay of these treatment requirements allows a comprehensive approach for depollution and resource preservation. Additionally, UBA proposes to include an obligation for the primary treatment facilities to establish a treatment plan for the documentation of treatment procedures in the Treatment Ordinance. Furthermore, the requirements for certification with regard to monitoring should be adjusted. For the development of treatment requirements the European standard series EN 50625 (developed under mandate M/518 of the European Commission) was analyzed and appraised, and considered in the recommended treatment requirements.

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis .....	9
Behandlungsanforderungen .....	11
Abkürzungsverzeichnis .....	14
1 Einleitung.....	19
1.1 Motivation, Erkenntnisstand und Ziel .....	19
1.2 Prozessdarstellung und Vorgehensweise .....	20
2 Arbeitsgrundlagen zur Aufstellung der Behandlungsanforderungen von EAG.....	21
2.1 WEEE-RL und ElektroG .....	21
2.2 Gesetzliche Regelungen in anderen Staaten .....	21
2.2.1 Österreich .....	21
2.2.2 Schweiz .....	22
2.3 Kompendium „Informationen zur Schadstoff- und Ressourcenrelevanz von Werkstoffen und Bauteilen von EAG“ .....	22
2.4 Richtlinien und Normen .....	22
2.4.1 LAGA-Mitteilung M 31 A und B.....	22
2.4.2 CENELEC-Normen zur Sammlung, Logistik und Behandlung von EAG.....	23
2.5 Wissenschaftliche begleitende Forschungsvorhaben.....	24
2.5.1 Vorhaben zum Recycling von Edel- und Sondermetallen.....	24
2.5.2 Sachverständigen-Gutachten zu Anforderungen an die Behandlung spezifischer EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten .....	25
2.5.3 Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Empfehlungen zur Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten.....	25
2.6 AK EAG Behandlungsanforderungen .....	25
3 Methodik zur Aufstellung der Behandlungsanforderungen von EAG.....	27
4 Empfehlungen des UBA zu Behandlungsanforderungen von EAG.....	29
4.1 AG 1 – Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile.....	32
4.1.1 Separation der hochwertigen Leiterplatten .....	33
4.1.2 Möglichst vollständige Lenkung weiterer edelmetallhaltiger Fraktionen in die Edelmetallrückgewinnung .....	49
4.1.3 Verwertung der Leiterplattenfraktionen nach dem Stand der Technik .....	57
4.1.4 Weitere ressourcenrelevante Bauteile.....	68
4.2 AG 2 – Bildschirmgeräte.....	79
4.2.1 Grundsätzliche Anforderungen.....	79
4.2.2 Kathodenstrahlröhren-Geräte (CRT).....	95

4.2.3	Flachbildschirm-Geräte.....	103
4.3	AG 3 – Photovoltaikmodule .....	115
4.4	AG 4 – Kunststoffe .....	138
4.4.1	Steigerung der werkstofflichen Verwertung der Kunststoffe.....	138
4.4.2	Ausschleusung polybromierter Flammschutzmittel in Kunststoffen zur werkstofflichen Verwertung .....	150
4.5	AG 5 – Schadstoffentfrachtung.....	157
	AG 6 – Kühlgeräte.....	180
4.6	Übergreifende Empfehlungen .....	181
4.6.1	Monitoring .....	181
4.6.2	Behandlungskonzept.....	181
4.6.3	Revisionsklausel/Evaluierung der Ziel- und Grenzwerte .....	183
5	CENELEC Zusammenfassung .....	185
5.1	Auswertung der CENELEC-Normenreihe EN/TS 50625.....	185
5.1.1	Allgemeine Hinweise.....	185
5.1.2	Wertstoffrückgewinnung.....	186
5.1.3	Schadstoffentfrachtung .....	188
5.1.4	Behandlungspraxis in Deutschland .....	192
5.1.5	Monitoring und Auditierung .....	192
5.1.6	Fazit zur CENELEC-Normenreihe 50625.....	196
6	Definitionen.....	197
7	Reihung der Behandlungsanforderungen von Elektroaltgeräten .....	199
7.1	Platzierungskriterien .....	199
7.1.1	Umweltrelevanz .....	199
7.1.2	Wirtschaftlichkeit (Aufwand/Erlösmöglichkeiten).....	200
7.1.3	Umsetzbarkeit.....	200
7.1.4	Vergleichbare Anforderungen .....	200
7.1.5	Effekte der Regelung.....	200
7.2	Reihung .....	201
8	Quellenverzeichnis .....	204
A	Anhang .....	213
A.1	Anlage 4 ElektroG.....	213
A.2	Punkteverteilung für die Reihung .....	215

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema zur Zuordnung der Behandlungsanforderungen der Kategorien „Verfahrensanforderung“ und „Zielanforderung“ mit zwei bzw. drei Unterkategorien (eigene Darstellung, UBA).....	27
Abbildung 2: Vereinfachtes Schema zur Einsortierung der Anforderungen (eigene Darstellung, UBA) .....	28
Abbildung 3: Behandlungskompass AG 1, 4 und 5 (eigene Darstellung, UBA) .....	30
Abbildung 4: Behandlungskompass AG 2 und 3 (eigene Darstellung, UBA) .....	31
Abbildung 5: Schema zum Anfall von edelmetall- und sondermetallhaltigen Fraktionen bei der Behandlung von EAG (eigene Darstellung, UBA).....	32
Abbildung 6: Zusammensetzung von sechs zerlegten Routern und Demontagezeit [9] .....	38
Abbildung 7: Bestand von Haushaltsgroßgeräten (linke Y-Achse) und Anteil der smarten Geräte (rechte Y-Achse) in EU 28 (ab 2015 Prognose) [10], Datengrundlage [15] .....	38
Abbildung 8: Edelmetall-Mengenströme im Batchversuch der mechanischen EAG-Behandlung [20] ..	51
Abbildung 9: Absatz von Fernseh-Bildschirmen und Computer-Monitoren [56] .....	80
Abbildung 10: Abfallpotenzial für CRT-Geräte bis 2025 in Deutschland [10] .....	80
Abbildung 11: Schadstoffeinträge in der Umgebung einer Recyclinganlage für EAG (veränderte Darstellung nach [64] .....	84
Abbildung 12: Messung der emittierenden Hg-Konzentrationen aus einem LCD-Fernseher mit zerstörter Hintergrundbeleuchtung [9].....	90
Abbildung 13: Prognose anfallender Schirmglasmengen in Deutschland pro Jahr .....	99
Abbildung 14: Prognose anfallender Konusglasmengen in Deutschland pro Jahr .....	100
Abbildung 15: Einsparungspotenzial nach Verwertungsweg von Schirmglas.....	101
Abbildung 16: Anteile verschiedener Kunststoffarten in Flachbildschirmgeräten [76].....	107
Abbildung 17: Zusammensetzung von PV-Modulen [87].....	128
Abbildung 18: Ökobilanz für das hochwertige Recycling von Siliziummodulen [93] .....	136
Abbildung 19: In-Verkehr-Bringung und Anfall der derzeitig entsorgten PBDE-belasteten Kunststoffe mit durchschnittlicher Nutzungsdauer nach [123].....	155
Abbildung 20: In-Verkehr-Bringung und Entsorgung von PCB-haltigen Geräten mit durchschnittlicher Nutzungsdauer nach [123] .....	175
Abbildung 21: Anwendungsfelder von Beryllium [10] .....	177
Abbildung 22: Punkteverteilung nach Reihung .....	201

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kategorien und Sammelgruppen ab 15.08.2018 nach Umsetzung ElektroG .....	21
Tabelle 2:	CENELEC-Normen unter dem Mandat M/518 – Stand: Juli 2018 .....	23
Tabelle 3:	Tabelle von Leitgeräten mit besonders hohen Wertstoffgehalten in Leiterplatten je Kategorie nach ElektroG ab 15.08.2018 .....	34
Tabelle 4:	Goldgehalt der Leiterplatten in ausgewählten Elektrogeräten, bezogen auf das Gerätegewicht [14]; Rechte Spalten: Geräte mit den höchsten Gold/Silber-Gehalten aus 30 Gerätearten des Projekts RePro [12] .....	37
Tabelle 5:	Treibhauspotenzial der Herstellung enthaltener Edelmetalle in ausgewählten Elektrogeräten mit hochwertigen Leiterplatten (vgl. auch Geräteliste der Tabelle 4), [10, 12] .....	40
Tabelle 6:	Bewertung des zusätzlichen Behandlungsaufwands für die Leitgeräte mit hochwertigen Leiterplatten und eventuelle Synergien mit der Schadstoffentfrachtung/Wertstoffgewinnung.....	42
Tabelle 7:	Mengen der Leiterplattenfraktionen pro Sammelgruppe. Vorläufige Zielwerte aus der WEEELABEX-Zertifizierung [27] und Ergebnisse der UBA-Umfrage bei Erstbehandlern .....	47
Tabelle 8:	Modellierung der Goldmassenströme im Jahr 2020 für die EAG-Entsorgung in Deutschland für drei Szenarien [17].....	52
Tabelle 9:	Treibhauspotenzial der zusätzlich in Deutschland aus EAG rückgewinnbaren Edelmetalle bei Steigerung des Rückgewinnungsgrades von 80 % auf 90 %, Ausgangsdaten: Edelmetallgesamtmenge aus RePro-Szenario OPT [17], GWP der Metalle aus [10].....	53
Tabelle 10:	Marktwert der zusätzlich in Deutschland aus EAG rückgewinnbaren Edelmetalle bei Steigerung des Rückgewinnungsgrades von 80 % auf 90 % .....	53
Tabelle 11:	Gegenüberstellung von ausgewählten Grenzwerten aus den BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie und aus der CENELEC TS 50625-5 für die Endbehandlung kupfer- und edelmetallhaltiger Fraktionen aus Elektroaltgeräten.....	62
Tabelle 12:	Mengenpotenziale NdFeB-Magnete in Deutschland 2020 aus Elektroaltgeräten und weiteren Abfällen [17, 36, 40].....	71
Tabelle 13:	Neodym in festplattenhaltigen Produkten.....	71
Tabelle 14:	SE-Magneten in Pedelec-Motoren .....	72
Tabelle 15:	Verkaufszahlen für elektrische Fahrräder in Deutschland und in den Motoren enthaltenes Neodym [36, 41].....	72
Tabelle 16:	Kostenschätzung und mögliche Erlöse für die Zerlegung von Festplatten .....	74
Tabelle 17:	Abfallmengenprognose Bildschirmgeräte bis 2030 nach zwei Szenarien (eigene Darstellung nach [62]) .....	82
Tabelle 18:	Hg-Gehalt in beschädigten Flachbildschirmgeräten nach Untersuchungen des IUTA (eigene Darstellung nach [9]) .....	85
Tabelle 19:	Masse der LCD-Panels in LCD-Fernsehgeräten und Monitoren nach verschiedenen Untersuchungen (eigene veränderte Darstellung, UBA).....	111
Tabelle 20:	Übersicht der Indiumgehalte in LCD-Panels nach [9].....	112

Tabelle 21:	Indiumgehalte in LCD-Anwendungen (eigene Darstellung nach [62]) .....	112
Tabelle 22:	Abfallpotenzial im Jahr 2020 nach PV-Technologien in Deutschland (Angaben in t) [10].....	116
Tabelle 23:	Prognose der PV-Abfallmengen in Deutschland für die Jahre 2025 bis 2050 [83]	116
Tabelle 24:	Glasabfall in Deutschland je nach Modultechnologie für das Jahr 2020 .....	128
Tabelle 25:	Abfallpotenzial in kg für CdTe im Jahr 2020 .....	130
Tabelle 26:	Abfallpotenzial in t für Al im Jahr 2020 .....	132
Tabelle 27:	Abfallpotenzial in kg für In und Ga im Jahr 2020.....	135
Tabelle 28:	Abfallpotenzial in t bzw. kg für Si und Ag im Jahr 2020 .....	135
Tabelle 29:	Zusammensetzung Sammelgruppe Großgeräte in Österreich [109] .....	140
Tabelle 30:	Zusammensetzung Sammelgruppe Kleingeräte in Österreich [109].....	141
Tabelle 31:	Analysen zu Art und Konzentration von ausgewählten bromierten Flammschutzmitteln sowie Gesamtbromkonzentration in ppm.....	156
Tabelle 32:	Rechtliche Regelungen für Kondensatoren und Transformatoren in Bezug auf PCB [134] .....	172
Tabelle 33:	Übernommene Anforderungen aus der CENELEC-Normenserie EN 50625.....	187
Tabelle 34:	Empfohlene Behandlungsanforderungen, die in CENELEC nicht adressiert werden .....	188
Tabelle 35:	Übernommene Anforderungen aus der CENELEC-Normenreihe 50625 und nicht adressierte Anforderungen zur Schadstoffentfrachtung .....	189
Tabelle 36:	Anforderungen der CENELEC-Normenreihe 50625 an eine Behandlungsanlage zu Monitoring und Auditierung im Vergleich zum UBA-Behandlungskonzept / UBA-Behandlungsanforderung.....	194
Tabelle 37:	Definitionen verwendeter Begriffe .....	197
Tabelle 38:	Liste der 30 Behandlungsanforderungen (ab 10 Punkte TOP 20) mit den höchsten Punktezahlen .....	202
Tabelle 39:	Punkteverteilung für die Reihung nach 5 Kriterien .....	215

## Behandlungsanforderungen

Behandlungsanforderung 1: Separation leiterplattenhaltiger Geräte vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung .....	33
Behandlungsanforderung 2: Leiterplattenseparation vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung.....	33
Behandlungsanforderung 3: Separation von min. 4 Gew.-% Leiterplatten aus FBS-Geräten.....	45
Behandlungsanforderung 4: Kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung.....	49
Behandlungsanforderung 5: Abgabe separierter Leiterplattenfraktionen und edelmetallhaltiger schadstoffentfrachteter EAG.....	57
Behandlungsanforderung 6: Abtrennung von Aluminium-Kühlkörpern von Leiterplatten .....	66
Behandlungsanforderung 7: Separation SE-haltiger Magneten aus Festplatten und Pedelecs .....	69
Behandlungsanforderung 8: Kein Abkippen der BSG aus dem Container, mind. Abstellen des Containers .....	79
Behandlungsanforderung 9: Witterungsgeschützte Lagerung von CRT-/FBS-Geräten .....	87
Behandlungsanforderung 10: BSG: Erfassung des Staubes und Quecksilbers am Entstehungspunkt .	89
Behandlungsanforderung 11: Werkstoffliche Verwertung der Kunststoffe von BSG-Rückwänden.....	92
Behandlungsanforderung 12: Separation von CRT-Geräterückwänden vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung .....	95
Behandlungsanforderung 13: Trennung von Konus- und Schirmglas aus CRT-Geräten.....	96
Behandlungsanforderung 14: Werkstoffliche Verwertung min. 25 Gew.-% des CRT-Geräteinputs ....	97
Behandlungsanforderung 15: Max. 5 mg/kg Schwefel in gereinigter CRT-Glas-Fraktion .....	97
Behandlungsanforderung 16: PbO-Gehalt der Schirmglasfraktion: maximal 0,1 % .....	97
Behandlungsanforderung 17: Grenzwerte für CRT-Glas in sonstigen Fraktionen .....	97
Behandlungsanforderung 18: Keine Verwertung des CRT-Glases als Baumaterial .....	98
Behandlungsanforderung 19: Erzeugung einer separaten Lampenfraktion bei FBS-Geräten mit Hg-Hintergrundbeleuchtung.....	103
Behandlungsanforderung 20: Getrennte Folgebehandlung von FBS-Geräten und Hg-haltigen Lampen.....	103
Behandlungsanforderung 21: Lagerung von Lampenbruch aus FBS-Geräten in dicht verschlossenem Gebinde .....	104
Behandlungsanforderung 22: Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten u. werkstoffliche Verwertung.....	106
Behandlungsanforderung 23: Max. 0,5 mg Quecksilber / kg für alle Fraktionen aus FBS-Geräten....	109
Behandlungsanforderung 24: 2025: Rückgewinnung des Indiums aus FBS-Geräten .....	111
Behandlungsanforderung 25: PV-Module: Bruch sichere Entladung, Lagerung und Umgang; kein Vorbrechen oder Verdichten.....	115

Behandlungsanforderung 26: Die Gefahr eines Kurzschlusses in PV-Modulen ist auszuschließen....	118
Behandlungsanforderung 27: Witterungsgeschützte Lagerung der PV-Module.....	119
Behandlungsanforderung 28: Keine Vermischung der PV-Module mit Bauabfällen.....	120
Behandlungsanforderung 29: PV-Module: Erfassung des Staubes am Entstehungspunkt .....	122
Behandlungsanforderung 30: Getrennte Behandlung von Si-basierten und nicht-Si-basierten PV-Modulen .....	124
Behandlungsanforderung 31: Grenzwerte für Pb, Cd und Se für Fraktionen zur Verwertung aus PV-Modulen .....	124
Behandlungsanforderung 32: Keine Vermischung oder Verdünnung schadstoffhaltiger PV-Fraktionen .....	125
Behandlungsanforderung 33: Keine Vermischung oder Verdünnung schadstoffhaltiger PV-Fraktionen .....	127
Behandlungsanforderung 34: Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen.....	130
Behandlungsanforderung 35: Werkstoffliche Verwertung von Al aus PV-Modulbehandlung .....	132
Behandlungsanforderung 36: 2030: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von In und Ga aus PV-Modulen .....	134
Behandlungsanforderung 37: 2025: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von Ag und Si aus PV-Modulen .....	134
Behandlungsanforderung 38: Quoten zur werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen aus EAG je SG .....	138
Behandlungsanforderung 39: Separation von losen Glas- und Kunststoffinnenteilen aus Kühlgeräten .....	144
Behandlungsanforderung 40: Separation von Holz aus Geräten > 25 cm Kantenlänge.....	146
Behandlungsanforderung 41: Separation der Staubsaugerbeutel vor Zerkleinerung.....	148
Behandlungsanforderung 42: Grenzwert von max. xxxx ppm bromierten Flammschutzmittel in Kunststoffen .....	150
Behandlungsanforderung 43: Separation von Kunststoffteilen mit durch POP-VO geregelten Flammschutzmitteln.....	150
Behandlungsanforderung 44: Separation des Quecksilbers aus dental-medizinischen EAG .....	157
Behandlungsanforderung 45: Separation von zugänglichen Batterien nach § 14 ElektroG vor Zerkleinerung .....	159
Behandlungsanforderung 46: Zerstörungsfreie Separation von nicht zugänglichen Batterien.....	159
Behandlungsanforderung 47: Grenzwert von 100 mg Cd / kg der nichtmetallischen Restfraktion ...	160
Behandlungsanforderung 48: Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro Tonne des Inputs Kleingeräte .....	160
Behandlungsanforderung 49: Minimierung der Staubeentwicklung bei Entladung und Behandlung von EAG mit Tonern, Fotoleitertrommeln .....	164

Behandlungsanforderung 50: Separation von Tonerkartuschen, Farbtonern, Resttonerauffangbehältern.....	164
Behandlungsanforderung 51: Zuführung von Tonerkartuschen u. Tintenpatronen zur Vorbereitung zur Wiederverwendung.....	164
Behandlungsanforderung 52: Separation Cadmium- oder Selen-haltigen Fotoleitertrommeln .....	167
Behandlungsanforderung 53: Separation von Geräten mit Keramikfasern.....	168
Behandlungsanforderung 54: Zerstörungsfreie Separation von PCB- und Elektrolytkondensatoren ohne Flüssigkeitsaustritt .....	170
Behandlungsanforderung 55: Grenzwert 50 mg PCB / kg in der feinsten NMRF und Staubfraktion .	171
Behandlungsanforderung 56: Mindestmengen für die Separation von Kondensatoren aus EAG .....	171
Behandlungsanforderung 57: Separation von BeO-haltigen Bauteilen aus gewerblichen Geräten...	176

## Abkürzungsverzeichnis

<b>a</b>	Jahr
<b>AbfallBPV</b>	Verordnung über Abfallbehandlungspflichten in Österreich
<b>ABS</b>	Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>Ag</b>	Silber
<b>AG</b>	Arbeitsgruppe
<b>AK</b>	Arbeitskreis
<b>Al</b>	Aluminium
<b>ArbSchG</b>	Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit vom 07.08.1996 (Arbeitsschutzgesetz)
<b>Au</b>	Gold
<b>AVV</b>	Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis vom 10.12.2001 (Abfallverzeichnis-Verordnung)
<b>BDE 28</b>	2,4,4-Tribromdiphenylether
<b>BDE 47</b>	2,2,4,4-Tetrabromdiphenylether
<b>BDE 99</b>	2,2',4,4',5-Pentabromdiphenylether
<b>BDE 100</b>	2,2,4,4,6-Pentabromdiphenylether
<b>BDE 153</b>	2,2,4,4,5,5-Hexabromdiphenylether
<b>BDE 154</b>	2,2,4,4,5,6-Hexabromdiphenylether
<b>BDE 183</b>	2,2,3,4,4,5,6-Heptabromdiphenylether
<b>BDE 196/ 197/ 203</b>	Octabromdiphenylether
<b>BDE 209</b>	Decabromdiphenylether
<b>BehandV</b>	Behandlungsverordnung
<b>BeO</b>	Berylliumoxid
<b>BImSchG</b>	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge vom 17.05.2013 (Bundesimmissionsschutzgesetz)
<b>BImSchV</b>	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 31.05.2017 (Bundesimmissionsschutz-Verordnung)
<b>BSG</b>	Bildschirmgeräte
<b>B2B Geräte</b>	business-to-business-Geräte (Geräte anderer Nutzer als privater Haushalte, entspricht sinngemäß gewerbliche Geräte)
<b>B2C Geräte</b>	business-to-consumer-Geräte (Geräte aus privaten Haushalten)
<b>BTBPE</b>	1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan
<b>BVT</b>	beste verfügbare Technik (BVT-Merkblätter)
<b>CCFL-Röhren</b>	cold cathode fluorescent lamp (Leuchtstoffröhre)

<b>Cd</b>	Cadmium
<b>CdS</b>	Cadmiumsulfid
<b>CdTe</b>	Cadmiumtellurid (Solarzelle)
<b>CENELEC</b>	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung (französisch: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique; englisch: European Committee for Electrotechnical Standardization)
<b>ChemVerbots-VO</b>	Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens und über die Abgabe bestimmter Stoffe, Gemische und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz vom 20.01.2017 (Chemikalien-Verbotsverordnung)
<b>Cd</b>	Cadmium
<b>CI(G)S</b>	copper indium gallium selenide (solar cell) ( <u>Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid Solarzelle</u> )
<b>CLP-VO</b>	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen vom 16.12.2008 (CLP-Verordnung)
<b>Co</b>	Kobalt
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>CO<sub>2</sub> eq.</b>	Kohlendioxidäquivalente
<b>CRT</b>	cathode ray tube (Kathodenstrahlröhre)
<b>c-Si</b>	crystalline silicon (kristallines Silizium-Photovoltaikmodul)
<b>Cu</b>	Kupfer
<b>CuBe</b>	Berylliumkupfer
<b>dB(A)</b>	Schallpegel in Dezibel
<b>DBDPE</b>	Decabromdiphenylethan
<b>DecaBDE</b>	Decabromdiphenylether
<b>DGUV</b>	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung (DIN-Norm)
<b>Dy</b>	Dysprosium
<b>EAG</b>	Elektro- und Elektronikaltgeräte
<b>EBA</b>	Erstbehandlungsanlage(n)
<b>EERA</b>	European Educational Research Association
<b>EfBV</b>	Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe, technische Überwachungsorganisationen und Entsorgungsgemeinschaften vom 02.12.2016 (Entsorgungsfachbetriebeverordnung)
<b>ElektroG</b>	Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 16.03.2005 (Elektro- und Elektronikgerätegesetz)
<b>ElektroG II</b>	2015 novelliertes Elektro- und Elektronikgerätegesetz
<b>FBA</b>	Folgebehandlungsanlage(n)
<b>FBS</b>	Flachbildschirm

<b>FCKW</b>	Fluorchlorkohlenwasserstoff
<b>g</b>	Gramm
<b>Ga</b>	Gallium
<b>GefStoffV</b>	Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen vom 26.11.2010 (Gefahrstoffverordnung)
<b>GewAbfV</b>	Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen vom 18.04.2017 (Gewerbeabfallverordnung)
<b>Gew.-%</b>	Gewichtsprozent
<b>GJ</b>	Gigajoule
<b>GWP</b>	Global warming potential (Treibhauspotenzial)
<b>h</b>	Stunde
<b>HBCD</b>	Hexabromcyclododecan
<b>Hg</b>	Quecksilber
<b>HIPS</b>	High impact Polystyrene (hochschlagfestes Polystyrol)
<b>IED</b>	Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Industrieemissionsrichtlinie)
<b>In</b>	Indium
<b>I-TEQ</b>	Internationale toxische Äquivalenz, abgeleitet durch Anwendung internationaler toxischer Äquivalenzfaktoren im Sinne von Anhang VI Teil 2 der Richtlinie 2010/75/EU
<b>ITO-Schicht</b>	Indium-Zinn-Oxid-Schicht
<b>IUTA</b>	Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.
<b>i. V. g. M.</b>	in Verkehr gebrachte Menge
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>KrWG</b>	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24.02.2012 (Kreislaufwirtschaftsgesetz)
<b>KW</b>	Kohlenwasserstoff
<b>LAGA</b>	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
<b>LAGA-ARA</b>	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Ausschuss für Abfallrecht einschließlich EU-Angelegenheiten
<b>LCD</b>	liquid crystal display (Flüssigkristallanzeige)
<b>LED</b>	light-emitting diode (Leuchtdiode)
<b>mg</b>	Milligramm
<b>min</b>	Minute
<b>Mio.</b>	Million
<b>mm</b>	Millimeter

<b>µm</b>	Mikrometer
<b>Nd</b>	Neodym
<b>NdFeB</b>	Neodym-Eisen-Bor
<b>ng</b>	Nanogramm
<b>Nm<sup>3</sup></b>	Normkubikmeter (bei Messung des Volumens (des Abgases) im Normzustand (273,15 K, 101,3 kPa))
<b>NMRF</b>	Nicht-metallische Restfraktion
<b>OctaBDE</b>	Octabromdiphenylether
<b>oLED</b>	organic light-emitting diode (organische Leuchtdiode)
<b>Pb</b>	Blei
<b>PBDD</b>	polybromierte Dibenzodioxine
<b>PBDE</b>	polybromierte Diphenylether
<b>PBDF</b>	Polybromierte Dibenzofurane
<b>PbO</b>	Bleioxid
<b>PC</b>	Polycarbonat
<b>PCB</b>	polychlorierte Biphenyle
<b>PCDD/F</b>	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine/ polychlorierte Dibenzofurane
<b>Pd</b>	Palladium
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PentaBDE</b>	Pentabromdiphenylether
<b>PJ</b>	Petajoule
<b>PMMA</b>	Polymethylmethacrylat
<b>POP-VO</b>	Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>ppm</b>	parts per million (ein Millionstel = 10 <sup>-6</sup> , „Anteile pro Million“)
<b>PPE</b>	Polyphenylenether (Poly(oxy-2,6-dimethyl-1,4-phenylen; veraltet: Polyphenylenoxid, PPO)
<b>Pr</b>	Praseodym
<b>PS</b>	Polystyrol
<b>PUR</b>	Polyurethan
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RAL</b>	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.

<b>REACH</b>	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur (EU-Chemikalienverordnung)
<b>RePro</b>	UfoPlan-Vorhaben Ressourcenschonung und Produktverantwortung (FKZ 3711 95 318)
<b>ReStra</b>	UfoPlan-Vorhaben Recyclingpotenzial strategischer Metalle (FKZ 3711 93 339)
<b>RoHS-Richtlinie</b>	Richtlinie 2011/65/EU des europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten
<b>Sb</b>	Antimon
<b>SE-Magnete</b>	Selten-Erden-haltige Magnete
<b>SENS/SWICO</b>	Stiftung Entsorgung Schweiz / Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik siehe Technische Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten von SENS & Swico Recycling vom 02.11.2012
<b>SG</b>	Sammelgruppe
<b>Si</b>	Silizium
<b>Sn</b>	Zinn
<b>SO<sub>2</sub></b>	Schwefeldioxid
<b>t</b>	Tonne
<b>Ta</b>	Tantal
<b>TA</b>	Technische Anleitung (TA-Lärm/ TA-Luft)
<b>Tb</b>	Tiberium
<b>TBBPA</b>	Tetrabrombisphenol A
<b>Te</b>	Tellur
<b>TRGS</b>	Technische Regeln für Gefahrstoffe
<b>TVOC</b>	total volatile organic compounds (Summe der flüchtigen organischen Verbindungen)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>VOC</b>	volatile organic compounds (flüchtige organische Kohlenwasserstoffe)
<b>VREG</b>	Verordnung des Schweizerischen Bundesrates über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte vom 23.08.2005 (VREG)
<b>WEEE-Richtlinie</b>	Richtlinie 2012/19/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 04. Juli 2012 über Elektro- und Elektronikaltgeräte

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation, Erkenntnisstand und Ziel

Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) bildet seit 2005 die Basis für eine geordnete und umfängliche Entsorgung von Elektroaltgeräten (EAG). Über ein Jahrzehnt Entsorgung auf Basis dieser Rechtsvorschrift und der Blick in die Veränderungen des Gerätespektrums, des qualitativen und quantitativen Abfallaufkommens als auch das Ziel, diese Abfälle forciert als Rohstoffressource zu nutzen, eröffnen den Bedarf und die Chance, für EAG die Kreislaufwirtschaft neu zu justieren. Durch das Ressourceneffizienz-Programm der Bundesregierung ProgRess II [1] wird neben der Schadstoffentfrachtung die Ressourcenschonung, insbesondere der Edel- und Sondermetalle, betont, die in EAG enthalten sind. Unter Beachtung des Standes der Technik der Behandlung und der ökonomischen Rahmenbedingungen bedarf es daher eines klaren regulatorischen Rahmens, der durch konsequente Schadstoffentfrachtung und die notwendige frühzeitige Separierung wertstoffhaltiger Materialfraktionen aus dem Abfallstrom geeignete Stoffströme für eine werkstoffliche Verwertung schafft. Im Zusammenspiel mit Verpflichtungen, diese Stoffströme einer werkstofflichen Verwertung zuzuführen, kann so ein Beitrag zu den Zielen des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms geleistet werden.

Die Anforderungen zur Schadstoffentfrachtung nach § 20 in Verbindung mit Anlage 4 des ElektroG gehen auf entsprechende Anforderungen der Richtlinie 2012/19/EU des europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Richtlinie) zurück. Im Rahmen der Novellierung der WEEE-Richtlinie (Neufassung als Richtlinie 2012/19/EU) blieben die Anforderungen an die Behandlung von EAG unverändert. Spezifische Behandlungsvorgaben zur Stärkung der Ressourcenschonung existieren über die allgemeinen Recycling- und Verwertungsziele in § 22 ElektroG hinaus bislang nicht.

Das 2015 novellierte Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG II) enthält in § 24 Nr. 2 eine Ermächtigungsgrundlage für die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung weitergehende Anforderungen an die Behandlung von EAG, einschließlich der Verwertung und des Recyclings, festzulegen. Ziel ist eine Verordnung zur Behandlung von EAG.

Die angestrebte Behandlungsverordnung (BehandV) soll das ElektroG II als untergesetzliches Regelwerk ergänzen und konkretisieren hinsichtlich der Zielaspekte der Schadstoffentfrachtung und der Ressourcenschonung durch eine hochwertige Verwertung von EAG und der Rückgewinnung ressourcenrelevanter Materialien. Dabei werden neue Entwicklungen und Erkenntnisse seit der Einführung des ElektroG im Jahr 2005 berücksichtigt, die neuen Anforderungen an die Behandlung von EAG stellen. Vor dem Hintergrund der Veränderung des Gerätespektrums und des Schadstoffgehalts der EAG sowie im Abfallstrom zunehmender etablierter Gerätetechnologien (z. B. LCD Flachbildschirme, Photovoltaikmodule) betrachtete das Umweltbundesamt (UBA) den Status quo der Behandlung und die Effektivität einzelner Behandlungsverfahren. Die Notwendigkeit, bestehende Behandlungsanforderungen weiter zu konkretisieren und neue Anforderungen an die Behandlung von EAG zu stellen, wurde geprüft und, wo nötig, zusätzliche Behandlungsanforderungen entwickelt. In diesem Bericht werden die ökologische Vorteilhaftigkeit der Umsetzung der vom Umweltbundesamt für eine Behandlungsverordnung empfohlenen Behandlungsanforderungen und die Veränderungen gegenüber dem bestehenden Rechtsrahmen sowie dem Status Quo der Behandlung dargelegt. Es wird zudem eine Bewertung der ökonomischen Aspekte der Umsetzung, ein Vergleich der Anforderungen mit dem österreichischen und Schweizer Rechtsrahmen sowie der CENELEC-

Normen der 50625-Serie und eine abschließende Reihung anhand der dargelegten Aspekte vollzogen.

Zugleich werden in diesem Bericht die CENELEC-Normen der 50625-Serie kritisch bewertet und, wenn zielführend und geeignet, werden die Anforderungen aus den Standards zur Formulierung der Behandlungsempfehlungen genutzt.

## **1.2 Prozessdarstellung und Vorgehensweise**

Um nachvollziehbare und belastbare konkretisierende und ergänzende Anforderungen an die Behandlung von EAG ableiten zu können, ging das UBA wie folgt vor:

- ▶ Einrichtung eines Arbeitskreises mit themenspezifischen Arbeitsgruppen als Kernstück der Arbeiten zur Entwicklung der Empfehlungen für Behandlungsanforderungen im Jahr 2015;
- ▶ Auswertung von verschiedenen Anforderungen an die selektive Behandlung der Werkstoffe und Bauteile von Altgeräten nach Anlage 4 ElektroG in Form von 21 Datenblättern im Jahr 2015;
- ▶ Vergabe eines Sachverständigen-Gutachtens zu Detailfragen der Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten im Jahr 2015 mit Laufzeit bis 2016;
- ▶ Information des LAGA-Ausschusses APV auf der 34. Sitzung im Jahr 2015 und Bitte zur Unterstützung durch die Bundesländer, den Stand der Behandlung unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten zu betrachten und ggf. Handlungsempfehlungen zu entwickeln;
- ▶ Vergabe eines UFOPLAN-Vorhabens zur Unterstützung des Arbeitskreis- und Arbeitsgruppen-Prozesses sowie zur Recherche spezifischer fachlicher Fragen der Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten im Jahr 2016 mit Laufzeit bis 2017;
- ▶ Besichtigung von Anlagen zur Beurteilung der aktuellen Entwicklungen in der Branche;
- ▶ Spezifische Auswertung verschiedener Forschungsergebnisse zur Ressourcenschonung bei der Behandlung von EAG (ReStra, RePro, etc.);
- ▶ Mitwirkung in Gremien (Ad hoc-AG zur Überarbeitung der LAGA Mitteilung M 31, CENELEC-Normen der 50625-Serie).

Im nachfolgenden Kapitel werden die Arbeitsgrundlagen kurz vorgestellt, die der Erarbeitung und Begründung der Anforderungen dienen.

## 2 Arbeitsgrundlagen zur Aufstellung der Behandlungsanforderungen von EAG

### 2.1 WEEE-RL und ElektroG

Die Anforderungen an die selektive Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen von Altgeräten nach Anlage 4 des ElektroG sind im Anhang 9.1 dieses Berichts dargestellt. Sie zielen vorwiegend auf die Schadstoffentfrachtung der Altgeräte ab. Zu den Anforderungen der Kreislaufführung und Ressourcen-schonung gehören die massenbezogenen Recycling- und Verwertungsquoten in § 22 ElektroG.

Es findet gemäß Artikel 2 Absatz 1 b) i.V.m. Anhang III der WEEE- Richtlinie eine Umstellung der 10 Kategorien nach der WEEE-Richtlinie auf 6 Kategorien statt. Diese wurde im ElektroG zum 15.08.2018 umgesetzt. Zum 01.12.2018 wurden auch die Sammelgruppen an die 6 Kategorien angelehnt, sodass sich nun folgende Kategorien und Sammelgruppen aus Tabelle 1 ergeben:

**Tabelle 1: Kategorien und Sammelgruppen ab 15.08.2018 nach Umsetzung ElektroG**

Kategorien	Sammelgruppe
Kategorie 1: Wärmeüberträger	Gruppe 1: Wärmeüberträger
Kategorie 2: Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm <sup>2</sup> enthalten	Gruppe 2: Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm <sup>2</sup> enthalten
Kategorie 3: Lampen	Gruppe 3: Lampen
Kategorie 4: Großgeräte	Gruppe 4: Großgeräte
Kategorie 5: Kleingeräte	Gruppe 5: Kleingeräte und kleine Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik
Kategorie 6: Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte	Gruppe 6: Photovoltaikmodule

Die Abgrenzung zwischen Großgeräten und Kleingeräten erfolgt durch die äußeren Abmessungen der EAG. Großgeräte sind dann als Geräte definiert, bei denen mindestens eine der äußeren Abmessungen mehr als 50 cm beträgt, Kleingeräte sind Geräte, bei denen keine der äußeren Abmessungen mehr als 50 cm beträgt. Darüber hinaus greift ab dem 15.08.2018 der offene Anwendungsbereich (Open Scope).

### 2.2 Gesetzliche Regelungen in anderen Staaten

#### 2.2.1 Österreich

Die Abfallbehandlungspflichtenverordnung (AbfallBPV) regelt Mindestanforderungen an die Sammlung, Lagerung, den Transport und die Behandlung wichtiger Abfallströme in Österreich, welche am 07.10.2017 in Kraft getreten ist. Sie formuliert ca. 45 Anforderungen an die Behandlung von EAG. Die österreichischen Anforderungen wurden für die Ableitung von Behandlungsanforderungen geprüft und zum Teil für die Empfehlungen zur Behandlung von EAG berücksichtigt.

## 2.2.2 Schweiz

Die Betreiber der schweizerischen Systeme für das Recycling von EAG Sens und SWICO definieren technische Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten [2]. Diese enthalten Vorschriften zu Schadstoffentfrachtung und Verwertung sowie Richtlinien zur Behandlung von EAG in fünf Gerätekategorien. Auch fand der Entwurf für eine Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) Beachtung [3]. Die Anforderungen, insbesondere die über die Umsetzung der WEEE-Richtlinie hinaus gehenden, dienten als Anregung zur Ableitung von Behandlungsanforderungen. Einige wurden in die Empfehlungen zur Behandlung von EAG aufgenommen.

## 2.3 Kompendium „Informationen zur Schadstoff- und Ressourcenrelevanz von Werkstoffen und Bauteilen von EAG“

Das UBA-Kompendium stellt den Kenntnisstand des Jahres 2016 als Zusammenstellung von Informationen in 21 stoff-, bauteil- und gerätebezogenen Fact Sheets zur Ermittlung des Behandlungsbedarfs von EAG dar [4]. Die Fact Sheets erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gibt je ein Fact Sheet zu den Materialien und Bauteilen der Anlage 4 ElektroG, darüber hinaus zu den ressourcen- bzw. schadstoffrelevanten Stoffströmen Photovoltaikmodule, Permanentmagnete, lichtemittierende Dioden (LEDs) sowie den Elementen Antimon und Beryllium. Das jeweilige Fact Sheet listet Anforderungen an die Behandlung nach ElektroG, Vorkommen in der Sammelgruppe, den Status quo der Erstbehandlung, relevante Bauteile, relevante Geräte und Technologiesprünge (falls vorhanden), die Ressourcenrelevanz, die Stoffrelevanz, gesetzlich vorgeschriebene und unverbindliche Anforderungen an die Behandlung sowie festgeschriebene Grenzwerte auf. Es gibt Schlussfolgerungen je Werkstoff oder Bauteil an und führt die Motivation aus, um diesen Werkstoff oder dieses Bauteil zu behandeln.

Der Informationsstand aus dem Jahr 2016 dient als Grundbaustein zur Erarbeitung der Behandlungsanforderungen von EAG in diesem Bericht.

## 2.4 Richtlinien und Normen

### 2.4.1 LAGA-Mitteilung M 31 A und B

Die LAGA-Mitteilung M 31 zu „Anforderungen zur Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten“ aus dem Jahr 2009 konkretisiert die erforderlichen Anforderungen an die Abfallvermeidung, an die getrennte Erfassung der Altgeräte über die Sammlung, Lagerung und Behandlung bis zur schadlosen Verwertung nach dem Stand der Technik (§ 11 Abs. 2 ElektroG von 2005 in Verbindung mit § 3 Abs. 12 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes von 1994) mit dem Ziel eines ländereinheitlichen Vollzuges [5]. Diese Mitteilung wurde intensiv überarbeitet und besteht nun aus zwei Teilen. LAGA M 31 A zur „Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes“ befasst sich mit Anforderungen an die Entsorgung von EAG und wurde 2017 veröffentlicht [6]. LAGA M 31 B thematisiert die technischen Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von EAG und wurde 2018 veröffentlicht [7]. Um möglichst einheitliche Standards und Anforderungen an die Behandlung zu stellen, wurden einschlägige nationale und europäische Normen berücksichtigt. LAGA M 31 dient somit der Orientierung der Vollzugsbehörden zur Einhaltung bundesweiter einheitlicher Mindeststandards.

LAGA M 31 A und LAGA M 31 B wurden bei der Entwicklung der Empfehlungen zur Behandlung von EAG berücksichtigt.

## 2.4.2 CENELEC-Normen zur Sammlung, Logistik und Behandlung von EAG

Das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC; französisch: Comité Européen de Normalisation Électrotechnique; englisch: European Committee for Electrotechnical Standardization) ist eine Normungsorganisationen in Europa. Diese sind grundsätzlich keine verbindlichen Rechtsnormen, ihre Einhaltung kann jedoch durch Gesetze oder Verordnungen rechtsverbindlich werden, wenn dort auf die Normen Bezug genommen wird. Die Bezugnahme in Gesetzen und Verordnungen entlastet den Staat und die Bürger von rechtlichen Detailregelungen. Im Fall der Behandlung von EAG legt die WEEE-Richtlinie in Art. 8 Abs. 5 fest, dass die Kommission bis zum 14. Februar 2013 die europäischen Normungsorganisationen beauftragt, europäische Normen für die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten auszuarbeiten. Dieser Vorgabe ist die Kommission durch das Mandat M/518 nachgekommen [8]. Art. 8 Abs. 5 eröffnet außerdem für die Kommission die Möglichkeit, Durchführungsrechtsakte zu erlassen, mit denen Mindestqualitätsnormen festgelegt werden, die insbesondere auf diesen Normen beruhen.

In den letzten Jahren wurden in CENELEC unter dem Mandat M/518 mithilfe des Normungsgremiums K 191.06 Normen der Serie 50625 zur Sammlung, Logistik und Behandlung von EAG erarbeitet und teilweise bereits veröffentlicht, siehe 1. In diesem Bericht werden die CENELEC-Normen der 50625-Serie kritisch bewertet und, wenn zielführend und geeignet, werden die Anforderungen aus den Standards zur Formulierung der Empfehlungen für Behandlungsanforderungen genutzt. Folgende in der Tabelle 2 aufgelisteten Normen sind für die Berichterstattung relevant:

**Tabelle 2: CENELEC-Normen unter dem Mandat M/518 – Stand: Juli 2018**

Thema/Stoffstrom	Normen	Veröffentlichung
Allgemeine Anforderungen	DIN EN 50625-1	Sep 2014
Sammlung und Logistik	DIN CLC/TS 50625-4	Okt 2017 (Vornorm)
Schadstoffentfrachtung	DIN CLC/TS 50625-3-1	Jan 2015 (Vornorm)
Wärmeüberträger	DIN EN 50574-1	Okt 2012
	DIN TS 50574-2	Apr 2015
	DIN EN 50625-2-3	Juli 2018
	DIN CLC/TS 50625-3-4	Nov 2017 (Vornorm)
Lampen	DIN EN 50625-2-1	Apr 2015
	DIN CLC/TS 50625-3-2	Mai 2016
Bildschirmgeräte	DIN EN 50625-2-2	Jan 2016
	DIN CLC/TS 50625-3-3	Okt 2017 (Vornorm)
Photovoltaikmodule	DIN EN 50625-2-4	Apr 2018 (Vornorm)
	DIN CLC/TS 50625-3-5	Apr 2018 (Vornorm)
Endbehandlung der Fraktionen von EAG (Kupfer und Edelmetalle)	DIN EN 50625-5	Okt 2017 (Vornorm)

Die europäischen Normen (EN) werden alle 5 Jahre und die technischen Spezifikationen (TS) alle 3 Jahre überprüft. Die Normen EN und TS 50574 zur Kühlgerätebehandlung bestanden

schon vor dem Mandat M/518 und werden hier nicht betrachtet. Diese beiden Normen werden derzeit in die 50625-Serie unter dem Mandat M/518 überführt und dabei auch inhaltlich überarbeitet. Die Normen EN 50625-2-1 und die TS 50625-3-2 zu den Lampen werden hier ebenfalls nicht betrachtet, da sie erst bei der Aufstellung von Behandlungsanforderungen für Lampen in einem Folgebericht berücksichtigt werden sollen. Grundsätzlich wurden alle betrachteten Normen nicht umfänglich beurteilt, da zum Beispiel einzelne Aspekte wie Managementaspekte bei der Auswertung nicht umfassend bewertet werden konnten. Der Fokus lag auf für die BehandV relevanten Aspekte.

## 2.5 Wissenschaftliche begleitende Forschungsvorhaben

### 2.5.1 Vorhaben zum Recycling von Edel- und Sondermetallen

Bereits in den letzten Jahren wurden die drei UBA-Vorhaben RePro (Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschonungsaspekten, FKZ 3711 95 318), ReStra (Recyclingpotenziale strategischer Metalle, FKZ 3711 93 339) und ORKAM (Separation von Fahrzeugelektronik, FKZ 3713 33 337) hinsichtlich des Recyclings von Edel- und Sondermetallen durchgeführt. Die Projekte hatten zum Ziel, ausgehend von Analysen zu Stoffströmen, Stand der Forschung und Technik sowie weiteren Faktoren, Maßnahmen und Instrumente zum besseren Recycling von Edel- und Sondermetallen aus Elektroaltgeräten, Altfahrzeugen und weiteren relevanten Abfallströmen zu entwickeln. Es wurden Bewertungen zur ökologischen und wirtschaftsstrategischen Motivation des Recyclings der Edel- und Sondermetalle vorgenommen sowie Vorschläge für Maßnahmen und Instrumente zur Verbesserung des Recyclings der Edel- und Sondermetalle aufgeführt.

Als Grundprinzip hat sich ein sogenannter „**dualer Ansatz**“ aus input- und verfahrensbezogenen Maßnahmen herauskristallisiert, der die Generierung eines Abfallstroms als Input in Verwertungsanlagen (inputorientiert) und die Verfügbarkeit von großtechnischen Verwertungsanlagen (verfahrensorientiert) parallel und koordiniert voranbringt. Als inputbezogene Instrumente wurde das Pooling, die Kumulation durch Zwischenlagerung (siehe Forschungsvorhaben ILESA, FKZ 3716 33 316 0) und Separationsanforderungen mit der Erfassung und Behandlung edel- und sondermetallhaltiger Bauteile bzw. Geräte identifiziert. Damit ist ein Element der vorgeschlagenen Maßnahmen die Schaffung einer „Behandlungsverordnung“ unterhalb des ElektroG entstanden. Für die verfahrensbezogenen Instrumente wurden die Förderung der Entwicklung bzw. Optimierung von Rückgewinnungsverfahren und eine Investitionsabsicherung für erforderlich angesehen.

Die Ufoplan-Vorhaben RePro und ReStra fokussierten sich auf Elektrogeräte. RePro konzentrierte sich auf 30 ressourcenrelevante Gerätearten, überwiegend aus der Informations- und Kommunikationstechnik, wie PCs, Mobiltelefone, Drucker, Bildschirmgeräte, während in ReStra weitere Anwendungen wie Pedelects, Nabendynamos, Photovoltaikmodule, LED-Großleinwände und Server untersucht wurden. Für den vorliegenden Bericht waren die ermittelten, bisher nicht erschlossenen Recyclingpotenziale von Interesse, sowie die entwickelten Behandlungsempfehlungen zu ressourcenrelevanten Elektroaltgeräten und Bauteilen (wie Leiterplatten, Tantal-Kondensatoren).

Darüber hinaus wurden durch Impulsvorträge der TU Berlin Zwischenergebnisse des Ufoplan-Vorhabens zur Ressourceneffizienz unter der Ökodesign-Richtlinie („Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten“, FKZ 3714953070) zur Separierbarkeit von Leiterplatten, Batterien und Kunststoffteilen in die entsprechenden AGs eingebracht.

Parallel wurden veröffentlichte Ergebnisse aus Forschungsvorhaben des BMBF, insbesondere aus dem Förderprogramm r<sup>3</sup>, ausgewertet. Zwischenergebnisse aus laufenden Projekten wurden, u. a. durch Impulsvorträge von wissenschaftlichen Projektbearbeitern (z. B. AG 1: Fraunhofer IWKS mit RECVAl-HPM sowie gagentda+, Fraunhofer IVV mit AddResources), soweit möglich berücksichtigt. Insbesondere UPgrade unter Federführung der TU Berlin lieferte mit seinem Fokus auf ausgewählte Edel- und Sondermetalle aktuelle Daten für die AG 1.

### **2.5.2 Sachverständigen-Gutachten zu Anforderungen an die Behandlung spezifischer EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten**

Im Jahr 2015 vergab das UBA ein Sachverständigen-Gutachten zu Detailfragen der Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten an Dr. Brüning Engineering UG [9]. Gegenstand dieser Studie war die Betrachtung der Separation von Leiterplatten sowie Komponenten und Bauteilen ausgewählter Geräte, die Behandlung von Flachbildschirmen, hochwertige Verwertungsmöglichkeiten für Kunststoffe und die Behandlung von Photovoltaikmodulen. Die Effektivität der derzeitigen Behandlungsverfahren hinsichtlich Ressourcen- und Schadstoffaspekten wurde untersucht. Dazu wurden in erster Linie Literaturrecherchen und Auswertungen sowie Interviews mit verschiedenen Unternehmen entlang der Entsorgungskette durchgeführt und diese um praktische Demontage-, Zerkleinerungs- und Sortier-untersuchungen sowie chemische Analysen und Konzentrationsmessungen ergänzt. Die Ergebnisse dienen der Ableitung konkreter Behandlungsempfehlungen, die in diesem Bericht mit einbezogen wurden.

### **2.5.3 Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Empfehlungen zur Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten**

Das von Ökopol durchgeführte Vorhaben „Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten“ [9] diente überwiegend der Schließung spezifischer Informationslücken und der Beantwortung der offenen Fragen, die sich in dem Prozess zur Aufstellung von EAG-Behandlungsanforderungen herauskristallisiert hatten. Im Rahmen des Vorhabens wurden weitere offene Fragen in Anlagenbesichtigungen geklärt und ein Versuch zu Flammenschutzmitteln in Kunststofffraktionen durchgeführt. Daneben wurden die zahlreichen Treffen während des Prozesses im Jahr 2017 begleitet und das UBA bei deren Durchführung unterstützt. Letztlich war es Ziel des Vorhabens, für definierte Gerätekategorien, Komponenten oder Bauteile von EAG konkrete Behandlungsvorschläge zu entwickeln und zu begründen, welche für diesen Bericht dienen.

## **2.6 AK EAG Behandlungsanforderungen**

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) wie auch das UBA sahen die Notwendigkeit, die relevanten Akteure frühzeitig in die Diskussionen zu den Anforderungen an die Behandlung von EAG einzubinden.

Dazu wurde ein Arbeitskreis eingerichtet, der durch themenspezifische AGs begleitet wurde. Die Zusammensetzung des AK blieb über alle drei Sitzungen konstant. Er setzte sich vorrangig aus Experten der betroffenen Verbände und aus der Wirtschaft zusammen. In diesem wurden übergreifende und grundlegende ökologische sowie wirtschaftliche Themen bezüglich der Behandlung von EAG aufgegriffen und diskutiert. Aufgaben des Arbeitskreises waren der Wissenstransfer und ein Austausch mit den Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft. Weiterhin standen die Entwicklung, Diskussion und Bewertung von Anforderungen an die Behandlung von EAG unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte im Fokus.

Dabei wurde das UBA bei der Erarbeitung von konkreten Behandlungsanforderungen vom Arbeitskreis beraten.

Dem AK waren mehrere AGs zu verschiedenen Schwerpunktthemen untergeordnet. Die Themen der AG 1 bis 4 wurden vom UBA in den Prozess eingebracht, AG 5 und 6 wurden aufgrund der Vorschläge des AK gebildet:

- ▶ AG 1: Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile
- ▶ AG 2: Bildschirmgeräte
- ▶ AG 3: Photovoltaikmodule
- ▶ AG 4: Kunststoffe
- ▶ AG 5: Schadstoffentfrachtung
- ▶ AG 6: Kühlgeräte

Die AG-Teilnehmer und eingeladene Referentinnen und Referenten stellten im jeweils ersten Treffen den aktuellen Stand der Technik bei der Behandlung von EAG dar und informierten über neue Behandlungsverfahren – teilweise noch im Pilot- oder Labormaßstab befindlich – und technologische Neu-entwicklungen. Auf den jeweils zweiten Treffen stand eine beratende Funktion und fachliche Diskussion bei der Entwicklung von Behandlungsanforderungen im Fokus. Im Zeitraum von Frühjahr 2016 bis Frühjahr 2017 wurden die insgesamt 11 Treffen der AGs als teilnehmeroffene Fachgespräche mit Expertinnen und Experten aus den Bereichen der Elektroaltgerätebehandlung und -entsorgung, der Wissenschaft, Herstellern von Elektro- und Elektronikgeräten, Umwelt, Sozial- und Industrieverbänden und Vertreterinnen und Vertretern des Bundes, der Länder und der Kommunen durchgeführt, sodass insgesamt fast 200 Experten an dem Prozess teilgenommen haben. Die AG-Ergebnisse wurden gebündelt auf der 2. und 3. AK-Sitzung vorgestellt und diskutiert. Das UBA hat die Ergebnisse und die Statements der Akteure in die Ableitung der Empfehlungen zur Behandlung von EAG abwägend einbezogen. Alle Sitzungen wurden protokolliert. Grundsätzlich wurden zur Gewährleistung der Transparenz und Nachvollziehbarkeit alle in Bezug genommenen Dokumente in einer Cloud des UBA veröffentlicht und allen Interessierten zugänglich gemacht.

Über den Arbeitskreis und die Arbeitsgruppen hinaus wurde zusätzlich im Frühjahr 2017 ein Fachgespräch zum Thema Lampen „Behandlung und Verwertung, Empfehlungen zu Behandlungsanforderungen“ durchgeführt. Derzeit werden Vorbereitungen getroffen, auch für die EAG-Gruppe Lampen Empfehlungen für Behandlungsanforderungen zu entwickeln. Diese sollen in einem Folgebericht berücksichtigt und betrachtet werden.

### 3 Methodik zur Aufstellung der Behandlungsanforderungen von EAG

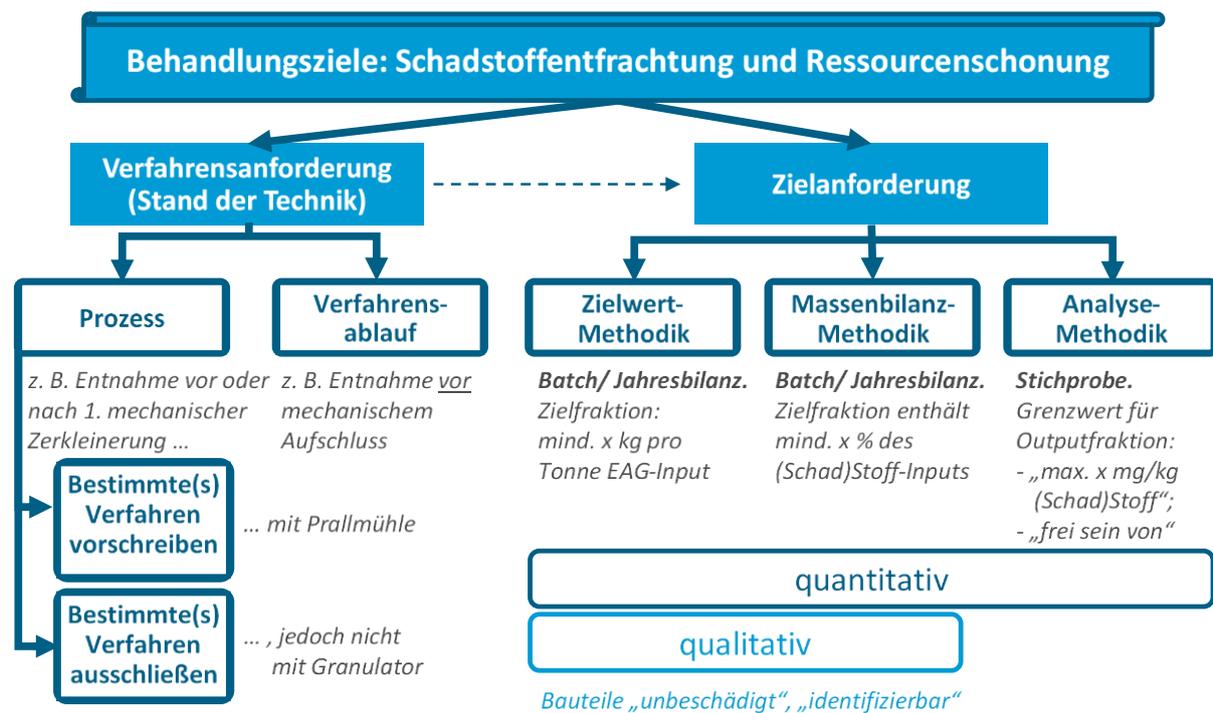
Die übergreifenden Ziele der Behandlung von EAG sind die umfassende Schadstoffentfrachtung und die Stärkung der Ressourcenschonung. Diese Ziele sind Leitmotiv aller Behandlungsanforderungen, deshalb wurden diese in jeder der AGs material-/gerätespezifisch dezidiert behandelt.

Weiterhin wurden potenzielle Behandlungsziele grundsätzlich systematisch als Verfahrensanforderung oder Zielforderung formuliert und konkretisiert.

1. Verfahrensanforderungen sind Prozessanforderungen oder Anforderungen zum Verfahrensablauf.
2. Zielforderungen folgen entweder der Zielwert-Methodik, der Massenbilanz-Methodik oder der Analyse-Methodik. Zielforderungen stellen in der Regel quantitative Anforderungen dar, sind teilweise jedoch auch qualitativ definiert. Die drei Methoden der Formulierung von Zielwerten wurden der Zielwertsystematik der CENELEC TS 50625-3-1 (Spezifikation zur Schadstoffentfrachtung) entlehnt.

Die nachfolgende Übersicht verdeutlicht die Unterschiede (Abbildung 1).

**Abbildung 1: Schema zur Zuordnung der Behandlungsanforderungen der Kategorien „Verfahrensanforderung“ und „Zielforderung“ mit zwei bzw. drei Unterkategorien (eigene Darstellung, UBA)**



In den jeweiligen AG-Sitzungen wurden potenzielle Behandlungsanforderungen stets entsprechend Abbildung 1 einer der fünf Unterkategorien zugeordnet. Nur bei einer Anforderung ist eine technische Ausführung vorgeschrieben (wie die händische Entnahme), sodass eine besonders hohe Anzahl an Anforderungen zum Verfahrensablauf zusortiert wurde. Damit lassen sich Verfahrensanforderungen technologieoffen aufstellen, um eine effektive

Schadstoffentfrachtung und Wertstoffseparierung zu gewährleisten, ohne die Verwendung bestimmter Technologien auszuschließen.

Dem Behandlungsprozess entsprechend werden daher die Behandlungsanforderungen gemäß Abbildung 2 den Prozessschritten nach zeitlichem Ablauf zugeordnet. Dabei wird die vor der Zerkleinerung durchzuführende Behandlung besonders berücksichtigt. Zielanforderungen werden dem Prozessoutput zugeordnet.

**Abbildung 2: Vereinfachtes Schema zur Einsortierung der Anforderungen (eigene Darstellung, UBA)**



## 4 Empfehlungen des UBA zu Behandlungsanforderungen von EAG

Zu den jeweils zweiten AG-Treffen hat das UBA konkrete Vorschläge für Behandlungsanforderungen entworfen und den AG-Teilnehmern zur Diskussion gestellt. Die Vorschläge wurden im Nachgang und unter Beachtung der Diskussionsergebnisse nachgeschärft und überarbeitet sowie am 13.06.2017 auf der 3. AK-Sitzung vorgestellt. In der finalen Prozessphase hat das UBA die entwickelten Anforderungen an die Behandlung von EAG unter Berücksichtigung aller Ergebnisse konkretisiert. Alle entwickelten Vorschläge für Anforderungen sind wesentlich, um eine Ressourcenschonung und Schadstoffentfrachtung bei der Behandlung von Elektroaltgeräten zu erreichen. Sie wurden abschließend noch hinsichtlich Umweltrelevanz, ökonomischer sowie technischer Umsetzbarkeit sowie Effektivität gereiht. Im Folgenden sind die Anforderungen thematisch sortiert nach den AGs vorgestellt.

Das entsorgungsablauforientierte Schema in Abbildung 2 dient der übersichtlichen Darstellung aller potenziellen Behandlungsanforderungen und kann als „Behandlungskompass“ verstanden werden (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Die durchnummerierten Behandlungsanforderungen zugehörig zu AG 1 sind grau dargestellt, zu AG 4 gelb, zu AG 5 grün, zu AG 2 rot bzw. zu AG 3 lila. Pinke Kreise entsprechen Anforderungen, die aus der CENELEC-Normenserie 50625 übernommen wurden. Dunkelgrüne Sterne sind Behandlungsanforderungen, die sich unter den TOP 20 befinden sowie hellgrüne, die unter die TOP 30 kamen.

Nachfolgende Unterkapitel enthalten alle Empfehlungen an die Behandlung von EAG des UBA. Sie bestehen jeweils aus tabellarischen Kurzübersichten, gefolgt von ausführlichen Begründungen. Die Kurzübersichten nennen den Adressaten (Definition siehe Kapitel 6), einen Vorschlag zum Monitoring (siehe Kapitel 0 unter Monitoring), den ökonomischen Aufwand und ökologische Aspekte der jeweiligen Behandlungsanforderung je AG. Es folgen ausführlichere Darstellungen zum bestehenden Rechtsrahmen, zum Status Quo, zu Mengenpotenzialen, zu ökologischen Aspekten und der Motivation, zu ökonomischen Aspekten, zu den CENELEC, zum weiteren Regelungsbedarf, zu Vorschriften anderer Staaten und weiterer Richtlinien, zur Position der AG und des AK sowie spezifische Begründungen.

Für den Unterabschnitt „bestehender Rechtsrahmen“ wird ein Bezug zum ElektroG und anderen gesetzlichen Regelwerken hergestellt. Grundsätzlich gelten die Regelungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, auch wenn es nicht explizit ausformuliert wird. Im Unterabschnitt „weiterer Regelungsbedarf“ werden weitere Punkte thematisiert, die bislang fehlende Aspekte für eine potenzielle Behandlungsverordnung ansprechen sowie weitere über den Rahmen einer Behandlungsverordnung hinausgehende Erfordernisse adressieren.

Abbildung 3: Behandlungskompass AG 1, 4 und 5 (eigene Darstellung, UBA)

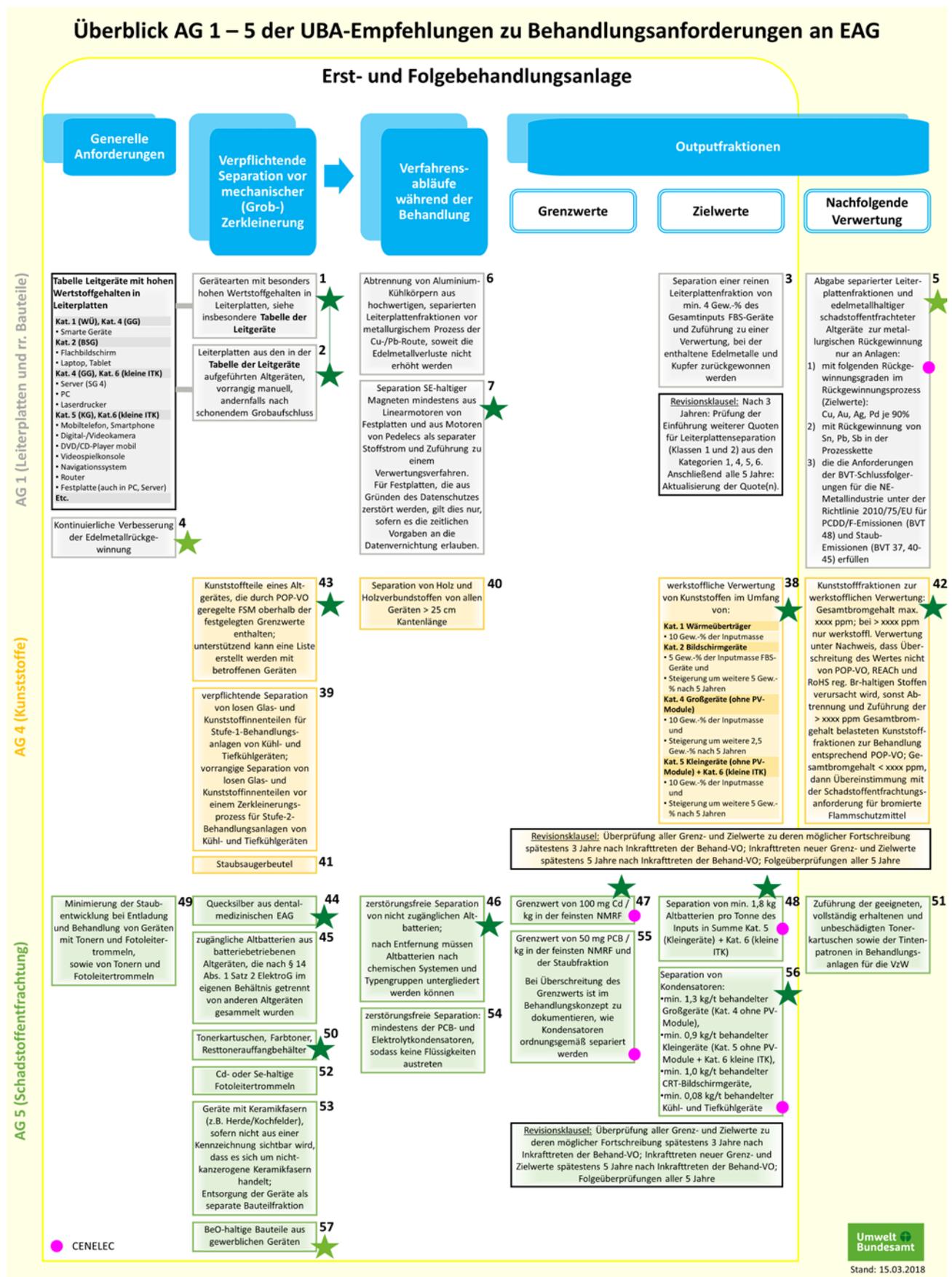
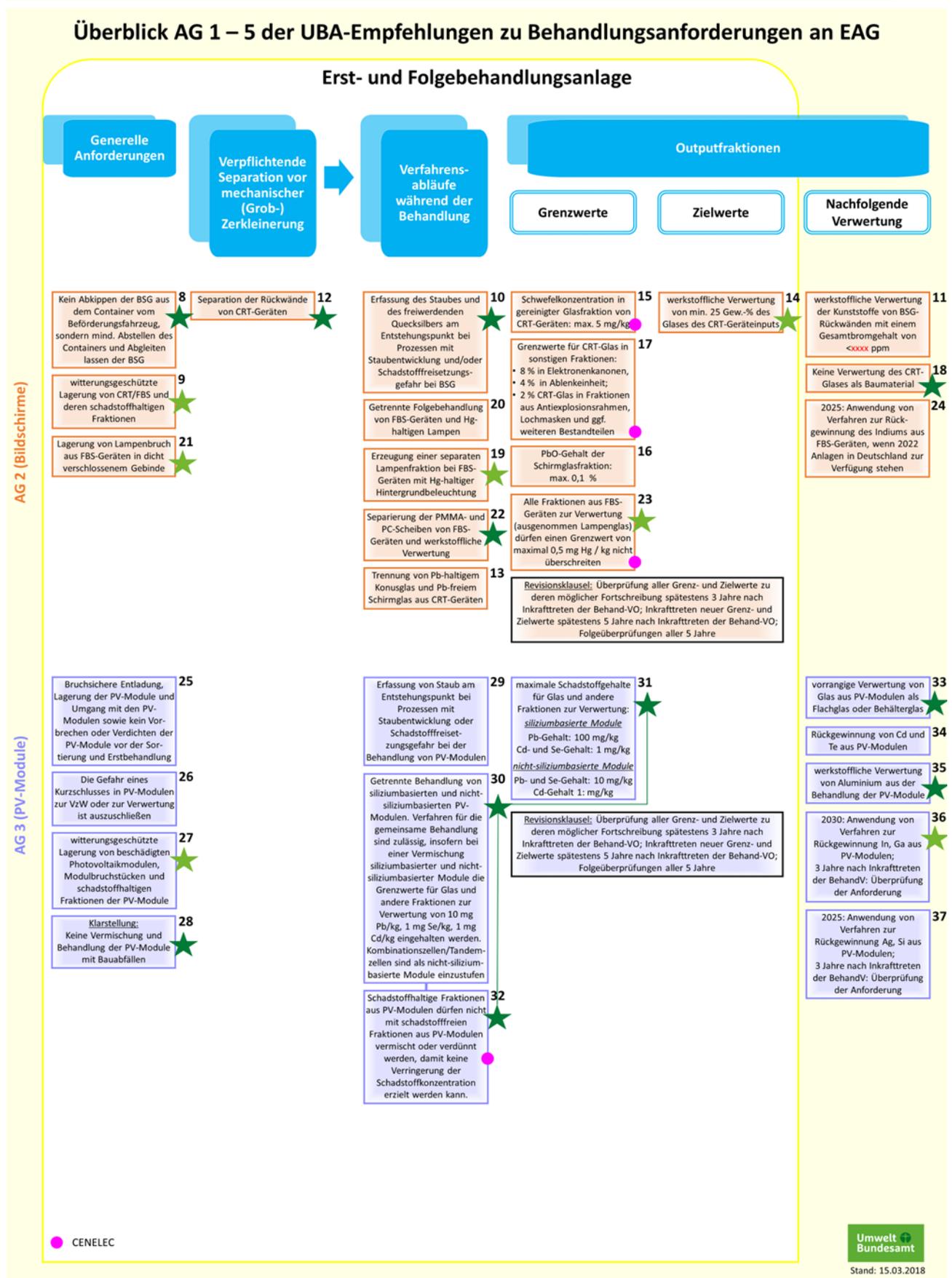


Abbildung 4: Behandlungskompass AG 2 und 3 (eigene Darstellung, UBA)



## 4.1 AG 1 – Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile

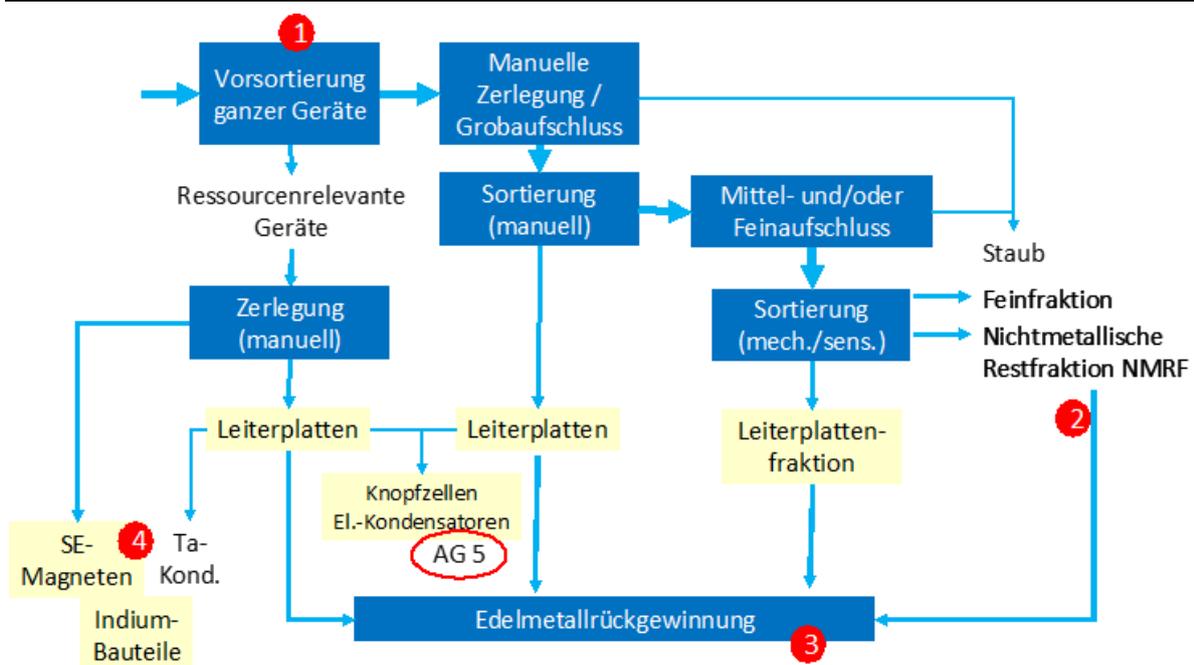
Die übergreifenden Behandlungsziele Schadstoffentfrachtung und Ressourcenschonung lassen sich für Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile folgendermaßen konkretisieren:

- ▶ Schadstoffentfrachtung nach Anlage 4 Elektro: Relevant für Leiterplatten sind die Separation der enthaltenen Batterien (Knopfzellen) sowie der Elektrolyt-Kondensatoren. Diese Fragen der Schadstoffentfrachtung werden in Kapitel 4.5 „AG 5 – Schadstoffentfrachtung“ mit behandelt.
- ▶ Ressourcenschonung: Ziel ist es, die Verluste an den enthaltenen
  - Edelmetallen Gold, Silber, Palladium,
  - an Kupfer und Zinn sowie
  - an den Sondermetallen Neodym bzw. Seltenerd-Magnetmaterialien, Tantal und Antimon zu reduzieren bzw. zu begrenzen.

Die Ziele der Ressourcenschonung werden in vier Unterziele untergliedert, die im Folgenden mit den zugehörigen Behandlungsempfehlungen ausgeführt werden:

- 1) Frühzeitige Separation hochwertiger Leiterplatten.
- 2) Möglichst vollständige Lenkung weiterer edelmetallhaltiger Fraktionen in die Edelmetallrückgewinnung.
- 3) Verwertung der Leiterplatten- und edelmetallhaltigen Fraktionen nach dem Stand der Technik.
- 4) Separation sondermetallhaltiger Bauteile und Zuführung zur Metallrückgewinnung.

**Abbildung 5: Schema zum Anfall von edelmetall- und sondermetallhaltigen Fraktionen bei der Behandlung von EAG (eigene Darstellung, UBA)**



#### 4.1.1 Separation der hochwertigen Leiterplatten

Besonders edelmetallhaltige Leiterplatten bzw. Altgeräte, die diese enthalten, müssen frühzeitig und vor mechanischen Beanspruchungen aus dem EAG-Strom separiert werden, um eine möglichst verlustfreie Edelmetallrückgewinnung zu ermöglichen.

**Behandlungsanforderung 1:** Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Gerätearten mit besonders hohen Wertstoffgehalten in Leiterplatten, siehe insbesondere Tabelle 3

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vorhandensein eines Arbeitsplatzes zur Separation der Geräte und eines Bereichs zur Zwischenlagerung und Bearbeitung der separierten Altgeräte.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering bis Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

In Kombination mit Behandlungsanforderung 2: Hoch

**Behandlungsanforderung 2:** Verpflichtende Separation von Leiterplatten aus den in der Tabelle 3 aufgeführten Altgeräten, vorrangig manuell, andernfalls nach schonendem Grobaufschluss

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

- 1) Ausrüstung: Vorhandensein eines Bereichs zur manuellen Bearbeitung der separierten Altgeräte bzw. eines Arbeitsplatzes zur Separation der Leiterplatten nach schonendem Grobaufschluss.
- 2) LP-Fraktion: Vorweisen einer Fraktion hochwertiger Leiterplatten, die unzerstört oder kaum zerstört sind. Umfang der separierten unbeschädigten Fraktion: siehe Behandlungsanforderung 3.
- 3) Stichprobenuntersuchung: Während der jährlichen Zertifizierung der EBA durch den Sachverständigen ist aus dem laufenden Betrieb eine Stichprobe dieser hochwertigen Leiterplattenfraktion im Umfang von 6 kg zu begutachten, ob die Leiterplatten nicht wesentlich zerkleinert wurden und die darauf befindliche Bestückung zum großen Teil nicht abgetrennt ist.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

In Kombination mit Behandlungsanforderung 1 Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Tabelle 3: Tabelle von Leitgeräten mit besonders hohen Wertstoffgehalten in Leiterplatten je Kategorie nach ElektroG ab 15.08.2018**

Gerätearten der Kategorien (Kat.)	Leitgeräte mit hohen Wertstoffgehalten in Leiterplatten
Kat. 1 (Wärmeüberträger), Kat. 4 (Großgeräte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Smarte Geräte (Definition siehe Kap. 6)</li> </ul>
Kat. 2 (Bildschirmgeräte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flachbildschirm</li> <li>• Laptop, Tablet</li> </ul>
Kat. 4 (Großgeräte), Kat. 6 (Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Server</li> <li>• PC</li> <li>• Laserdrucker</li> </ul>
Kat. 5 (Kleingeräte) Kat. 6 (Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobiltelefon, Smartphone</li> <li>• Digital-/Videokamera</li> <li>• DVD/CD-Player mobil</li> <li>• Videospielkonsole</li> <li>• Navigationssystem</li> <li>• Router</li> <li>• Festplatte (auch aus PCs, Servern). Für Festplatten, die aus Datenschutzgründen zerkleinert werden, gilt dies nur, sofern es die zeitlichen Vorgaben der Norm an die Datenvernichtung erlauben.</li> </ul>
Etc.	

### Bestehender Rechtsrahmen

Anlage 4 Nr. 1c) ElektroG schreibt die Separation von sonstigen Leiterplatten mit einer Oberfläche größer als 10 cm<sup>2</sup> aus Altgeräten vor. Dabei sind Leiterplatten von Mobiltelefonen unabhängig von ihrer Größe zu entfernen. Vorgaben zum Zeitpunkt innerhalb des Behandlungsprozesses bzw. zu einem zulässigen Zerkleinerungsgrad der Leiterplatten werden nicht gemacht.

Ein Großteil der in Tabelle 3 genannten Leitgeräte ist parallel Schadstoffentfrachtungsanforderungen nach Anlage 4 ElektroG unterworfen (insbesondere 1a) Hg-Bauteile, 1b) Batterien/Akkumulatoren, 1d) Tonerkartuschen).

Für die Leiterplatten aus Festplatten ist auch das Datenschutzrecht zu beachten. Ist eine Datenvernichtung vorgeschrieben, wird häufig DIN 66399 „Vernichten von Datenträgern“ angewendet. Laut dieser Norm ist die Vernichtung in Schutzklasse 2 (hoher Schutzbedarf für vertrauliche Daten) innerhalb von 24 Stunden nach Erhalt durchzuführen, bei Schutzklasse 3 sofort nach Erhalt. DIN 66399 schreibt zur Vernichtung stets eine Zerteilung und Verformung der Festplatte mit maximalen Teilchengrößen von 2000 mm<sup>2</sup> (Sicherheitsstufe H-4) bzw. 320 mm<sup>2</sup> (H-5) vor.

### Status Quo

Inwieweit Erstbehandler hochwertige Leiterplatten manuell separieren, ist in der Regel abhängig von ihrem Geschäftsmodell und der Wirtschaftlichkeit der manuellen Zerlegung. Aktuell werden besonders werthaltige Gerätearten bereits jetzt oftmals vom allgemeinen Altgerätestrom separat gehalten, um die hochwertigen Leiterplatten zu gewinnen [9]. Dies betrifft insbesondere Computer und Bildschirmgeräte.

- ▶ Im Falle der **Server** und oft auch **PCs** erfolgt die separate Behandlung aufgrund des ökonomischen Wertes der Komponenten und ggf. der Herkunft aus gewerblichen Rücknahmen.
- ▶ Im Fall der **Flachbildschirme** bzw. **Laptops/Tablets** erfolgt eine Separation aus Gründen der Schadstoffentfrachtung (mögliche Hg-Gehalte) und unterschiedlicher Behandlungspfade.
- ▶ Nach Aussage verschiedener Erstbehandler werden **Mobiltelefone und Smartphones** aufgrund ihres Wertes bereits heute oftmals separiert [10].

Jedoch wird ein Teil der Altgeräte der Liste der Leitgeräte derzeit in der Regel nicht vor der mechanischen (Grob-)Zerkleinerung separiert und mit anderen Geräten zusammen verarbeitet, z. B. **Kameras, CD-Spieler und Router**.

**Festplatten** kommen in Form von externen Festplatten und als Teile von Servern, PCs und Laptops im EAG-Strom vor. Sie werden teilweise aus Datenschutzgründen zerkleinert (Schätzungen eines Entsorgungsfachbetriebs zufolge: 10-20 % [11]), wobei die zugehörige Leiterplatte mit zerkleinert wird. Ansonsten werden Festplatten oft aus den Altgeräten als Monostrom separiert, teilweise verbleiben sie im allgemeinen Altgerätestrom und werden mit ihm zerkleinert. Im Falle der Festplattenseparation werden häufig die Leiterplatten manuell separiert, der Rest wird zur Gewinnung von Stahl und Aluminium geschreddert [11].

Mit zunehmender Zerkleinerung der Leiterplatten im Prozessablauf steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein höherer Anteil von Edelmetallen in Nicht-Leiterplatten-Fractionen ausgetragen wird.

Zunehmend sind Leiterplatten in „intelligenten Haushaltsgeräten“ (**smarte Geräte**) zu erwarten, d. h. Haushaltsgroßgeräte werden zunehmend mit elektronischen Elementen ausgestattet. Für Kühlgeräte, Waschmaschinen etc. sind Kühlgeräteschredder bzw. Großschredder die Standardbehandlungspfade, welche in der Regel auf die Gewinnung von Massenwerkstoffen, nicht jedoch von Leiterplatten/Edelmetallen ausgerichtet sind.

### **Mengenpotenzial**

Hochwertige, besonders edelmetallhaltige Leiterplatten sind verstärkt in bestimmten Geräten der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik anzutreffen.

Das Potenzial an Edelmetallen in den Elektrogeräten, die im Jahr 2010 in Deutschland in Verkehr gebracht wurden, beträgt etwa

- ▶ 3,3 bis 11 Tonnen Gold,
- ▶ 20 bis 54 Tonnen Silber und
- ▶ 1,1 bis 2,9 Tonnen Palladium.

Basis für diese Berechnung bildeten 30 ausgewählte Arten von Elektrogeräten, insbesondere solche mit ressourcenrelevanten Bauteilen [12].

Leiterplatten sind die relevanteste Edelmetallquelle in Elektroaltgeräten. Sie sind in vielen Elektroaltgeräten zu finden, weisen jedoch unterschiedlich hohe Edelmetallgehalte und Größen auf. Zur Vermarktung werden Leiterplatten je nach Wert grob in 3 Klassen (und ggf. weitere Unterklassen) eingeteilt [7, 13].

- ▶ Klasse 1 (hochwertige Leiterplatten): Die weitere Verwertung zielt auf die Rückgewinnung von Edelmetallen ab. Sie enthalten mehrere vergoldete Kontakte und Steckerleisten und stammen häufig aus der Computertechnik.
- ▶ Klasse 2: Leiterplatten mit wenig vergoldeten Bauteilen und ohne Anhaftungen oder größeren Bauteilen. Die weitere Verwertung zielt auf die Rückgewinnung von Edelmetallen ab. Sie stammen nicht aus Computern, sondern z. B. aus Bildschirmgeräten, Videorekordern etc.
- ▶ Klasse 3 („minderwertigere“ Leiterplatten): Mit geringen Edelmetallgehalten. Die Verwertung zielt auf die enthaltenen Nichteisenmetalle wie Kupfer und Aluminium (z. B. aus Kühlkörpern) ab.

Insgesamt machen die geringerwertigen Leiterplatten der Klasse 3 den größten Anteil aus. Bei einem Erstbehandler liegt ihr Anteil bei rund 80 % der sortierten Leiterplattenfraktionen nach Aussagen von einem Teilnehmer auf dem 1. AG 1-Treffen.

Die hochwertigen, edelmetallreichen Leiterplatten konzentrieren sich auf bestimmte Gerätearten. Speziell in Hochtechnologiegeräten (z. B. Servern, PCs, Laptops, Mobiltelefongeräten, Digitalkameras, Videokameras, etc.) kommen z. B. Gold, Silber, aber auch Tantal in höheren Konzentrationen vor, siehe Tabelle 4 für das Beispiel Gold.

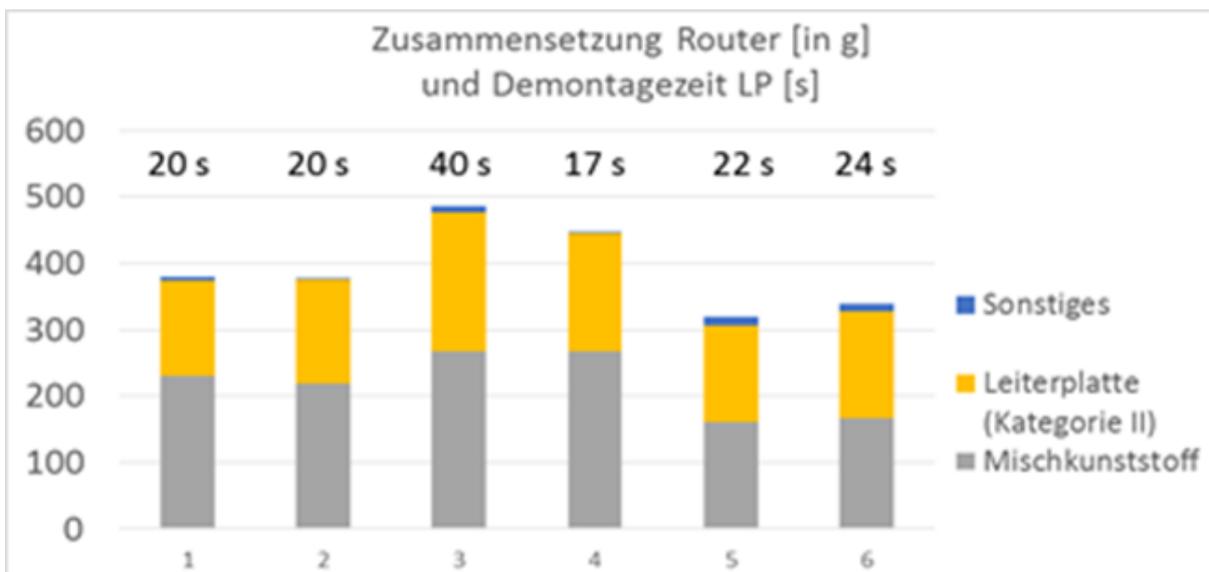
**Tabelle 4: Goldgehalt der Leiterplatten in ausgewählten Elektrogeräten, bezogen auf das Gerätegewicht [14]; Rechte Spalten: Geräte mit den höchsten Gold/Silber-Gehalten aus 30 Gerätearten des Projekts RePro [12]**

Gerät	Gold-Gehalt [mg/kg Gerät]	Gehört nach [12] zu den Geräten mit den höchsten Gehalten an ...	
		Gold	Silber
Mobiltelefon	281	X	X
Digitalkamera	160	X	X
MiniDisc-Spieler, tragbar	147		
Videokamera	94	X	X
Laptop	64	X	X
CD-Spieler, tragbar	37		
PC	19	X	X
DVD-Spieler	19	X	X
TV, LCD	16	X	X
TV, Plasma	12		
Faxgerät	4,3		
Kassettenradio	2,7		
Videorecorder, VCR	1,8		
Drucker	0,8		
Stereoanlage	0,7		
TV, CRT	0,1		X
Weitere Geräte		Videospielekonsole, Monitor und Navigationsgerät; Tablet (Gold); Schnurloses Heimtelefon (Silber)	

Die Auswertung in Tabelle 4 und die nachfolgenden ergänzenden Informationen wurden zur Ableitung der Liste der Leitgeräte (Tabelle 3) genutzt.

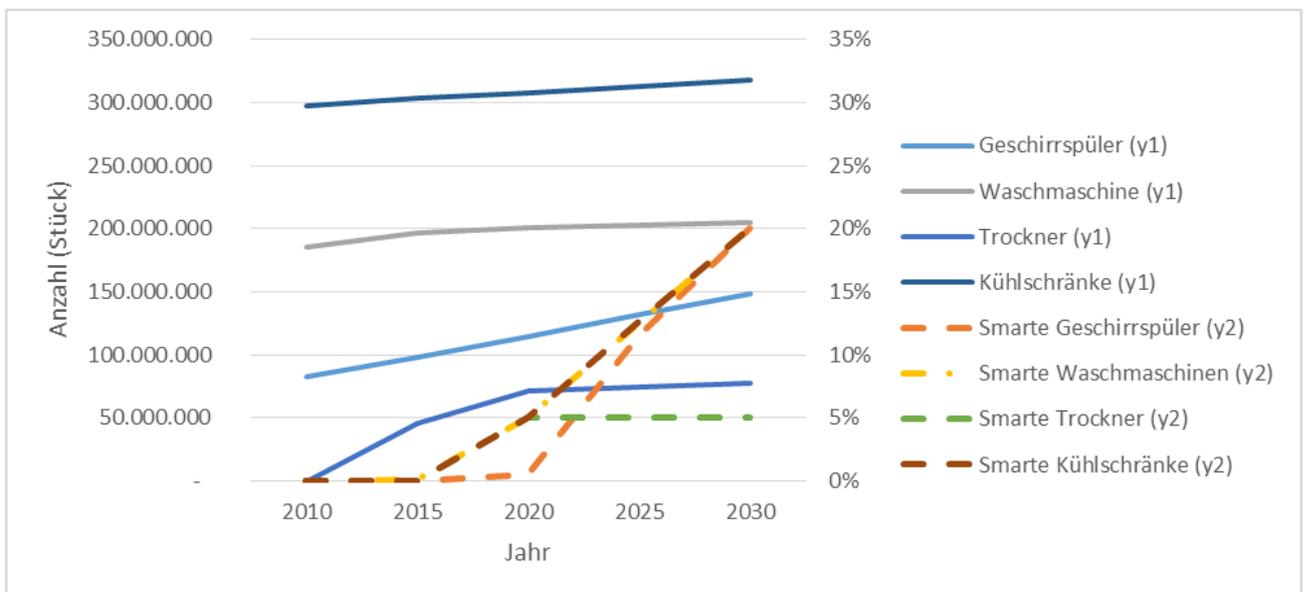
- ▶ **Laserdrucker** enthalten rund 1 kg Leiterplatten verteilt auf etwa ein Dutzend Stück, i.d.R. an einer Seite nach Aussage der TU Berlin auf dem 2. AG 1-Treffen.
- ▶ Zu **Flachbildschirmen** siehe Ausführungen zu Behandlungsanforderung 3.
- ▶ **Router** bestehen aus lediglich drei Hauptkomponenten: aus Kunststoff-Deckel und -Unterteil sowie zu einem sehr hohen Anteil, rund 50 %, aus relativ hochwertigen Leiterplatten (Klasse 2), siehe Abbildung 6 [9].

Abbildung 6: Zusammensetzung von sechs zerlegten Routern und Demontagezeit [9]



- In Großschreddern und Kühlgeräteschreddern sind **smarte Geräte** („intelligente Haushaltsgroßgeräte“) als zunehmend relevante leiterplattenhaltige Gerätearten, z. B. Kühlschränke, Waschmaschinen, Geschirrspüler, zu erwarten, deren Anteil bis 2030 voraussichtlich auf teilweise bis 20 % ansteigen wird, siehe Abbildung 7. Diese Geräte sind mit Komponenten zur drahtlosen Kommunikation wie Antennen, Steuerungselektronik und Kabeln ausgestattet. Eine Leiterplattenqualität der Klasse 2 kann angenommen werden. Die Bestandsentwicklung verläuft noch sehr dynamisch.

Abbildung 7: Bestand von Haushaltsgroßgeräten (linke Y-Achse) und Anteil der smarten Geräte (rechte Y-Achse) in EU 28 (ab 2015 Prognose) [10], Datengrundlage [15]



- **USB-Sticks** mit spezifisch hohen Edelmetallgehalten weisen sehr geringe Größen und mit 13 Gramm [12] ein sehr geringes Gewicht pro Stück auf. Die in Tabelle 4 als hoch edelmetallhaltig genannten **MiniDisc-Spieler** waren nur kurzzeitig auf dem Markt (siehe Protokoll 2. AG 1-Treffen), sodass ihnen keine hohe Mengenrelevanz beigemessen wird.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Aufgrund des hohen ökologischen Aufwandes der Edelmetallgewinnung hat ihre möglichst vollständige Rückgewinnung eine hohe Umweltentlastung zur Folge. Je stärker Leiterplatten bei der Behandlung zerkleinert und mechanisch beansprucht werden, desto höher die Gefahr, dass Edelmetalle in Fraktionen verloren gehen, aus denen Edelmetalle nicht zurückgewonnen werden. Daher sollte eine frühzeitige unzerstörte Separation der hochwertigen Leiterplatten erfolgen.

Leiterplatten sind das relevanteste Trägerbauteil von Kupfer, Edelmetallen (Gold, Silber, Palladium) und weiteren ressourcenrelevanten Metallen (z. B. Tantal, Antimon) in Elektrogeräten.

**Treibhauspotenzial:** Die ökologische Relevanz der Edelmetalle ist unter anderem an dem sehr hohen spezifischen Treibhauspotenzial ihrer Produktion erkennbar. Sander et al. nennen für die drei Gerätegruppen Haushaltsgroßgeräte, Haushaltskleingeräte und Geräte der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik aufsummierte durchschnittliche Treibhauspotenziale der Produktion der relevanten enthaltenen Materialien (10 Metalle; Kunststoff, Glas) zwischen knapp 2000 und rund 2500 kg CO<sub>2</sub> eq. pro Tonne Gerätegruppe [10]. Das enthaltene Eisen und Aluminium sowie der Kunststoff leisten im Durchschnitt die größten Beiträge zum Treibhauspotenzial.

Bei den Gerätearten mit hochwertigen Leiterplatten leisten die Edelmetalle, obwohl massenmäßig nur im Milligramm-Bereich enthalten, signifikante Beiträge zum Treibhauspotenzial, die bei manchen Gerätearten die Gesamthöhe der genannten Gerätedurchschnittswerte von 2.000 bis 2.500 kg CO<sub>2</sub> eq. pro t erreichen oder übertreffen, siehe Tabelle 5. Dies unterstreicht die Umweltrelevanz des Edelmetall-/Leiterplattenrecyclings.

**Tabelle 5: Treibhauspotenzial der Herstellung enthaltener Edelmetalle in ausgewählten Elektrogeräten mit hochwertigen Leiterplatten (vgl. auch Geräteliste der Tabelle 4), [10, 12]**

Gerät	Treibhauspotenzial der Edelmetalle pro Gerät in kg CO <sub>2</sub> eq. pro Tonne Gerät	
	GWP des Goldgehalts [10]	GWP des Gold-, Silber- und Palladiumgehalts (errechnet aus RePro-Daten [12])
Mobiltelefon	3.500	6300 / 4300
Digitalkamera	2.000	300
MiniDisc-Spieler, tragbar	1.800	
Videokamera	1.200	160
Laptop	800	510
CD-Spieler, tragbar	470	
PC	240	310
DVD-Spieler	230	210
TV, LCD	200	100 / Monitor: 180
TV, Plasma	150	
Tablet Computer		2800
MP3 Player		2500
USB-Stick		2500
Navigationsgerät		2300
Schnurloses Heimtelefon		470
Tragbare Videospiele		420

*Zum Vergleich*

*Durchschnittliches Treibhauspotenzial der 12 Hauptmaterialien der EAG-Gerätegruppen in kg CO<sub>2</sub> eq. pro Tonne Gerätegruppe [10]*

*Haushaltsgroßgeräte*

*ca. 2.500*

*Haushaltskleingeräte*

*ca. 2.500*

*Geräte der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik*

*ca. 1.900*

Gerechnet mit den spezifischen GWP-Werten in kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg Metall: Gold = 12.500, Silber = 196, Palladium = 3.880. Auf zwei Stellen gerundet.

**Schadstoffrelevanz:** Leiterplatten sind auch schadstoffrelevant. Sie enthalten bromierte Flammschutzmittel, in der Regel TBBPA, welches derzeit nicht unter REACH, der POP-VO oder RoHS beschränkt ist. Ergänzend wird teilweise Antimontrioxid, welches als karzinogen, Kategorie 2, eingestuft ist, eingesetzt. Antimon gehört außerdem zu den kritischen Rohstoffen der EU [16].

**Verluste durch mechanische Behandlung:** Mit zunehmender mechanischer Zerkleinerung im Prozessablauf wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass ein höherer Anteil von Edelmetallen in Fraktionen ausgetragen wird, aus denen die Edelmetalle nicht zurückgewonnen werden bzw. in denen eine Verdünnung stattfindet. In den letzten Jahren wurden die Zielfraktionen bzw. die Rückgewinnungsraten von Edelmetallen bei der EAG-Behandlung in verschiedenen Projekten [17-20] untersucht, teilweise wurde die manuelle der mechanischen Behandlung gegenübergestellt. Laut Salhofer et al. ließen sich bei der vertieften Zerlegung von PCs 97 % des Goldes zurückgewinnen, bei der mechanischen Aufbereitung lediglich 70 % [19]. Chancerel et al. konnten bei der mechanischen EAG-Behandlung eine signifikante Verteilung der Spurenmetalle in die Kunststoff- und die Eisenfraktion nachweisen, sodass nur 24 % des Goldes zurückgewonnen wurden [18].

Im Projekt RePro [17] wurde die mechanische Behandlung von Telefonen mit der manuellen Zerlegung verglichen. Bei der mechanischen Behandlung gerieten 77 % der ressourcenrelevanten Metalle in das Feingut, während bei der manuellen Zerlegung fast 90 % der ressourcenrelevanten Metalle in die Platinenfraktion gelangten, aus der die Edelmetalle direkt rückgewinnbar sind. Als Schlussfolgerung wurde empfohlen, bei der Erstbehandlung insbesondere hochwertige Leiterplatten zerstörungsarm zu separieren. In den Versuchen zur mechanischen Behandlung in UPgrade [20] fanden sich nur rund 10 % des Goldes, Silbers und Palladiums in der Leiterplattenfraktion, während ca. 30 bis 50 % dieser Metalle in die Sortierreste/Mischkunststofffraktion gelangten.

Während die genannte Literatur Rückgewinnungsgrade der Edelmetalle von lediglich 24 % bzw. 70 % nennt, wurde als Größenordnung der aktuellen durchschnittlichen Rückgewinnungsgrade bei den Erst- und Folgebehandlern auf dem 1. AG 1-Treffen 80-85 % genannt, u. a. durch verstärkten Einsatz nasser Sortierverfahren. Aufgrund der hohen Umweltrelevanz der Edelmetalle hätte eine Steigerung von 80-85 % auf z. B. 95 % Edelmetallrückgewinnung einen hohen Umweltentlastungseffekt.

Im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens gibt Ökopol für die optimierte EAG-Behandlung zur verbesserten Rückgewinnung von Gold, Silber und Palladium eine Entlastung im Jahr 2020 in einer Größenordnung von 12.000 t CO<sub>2</sub> eq. an [10].

Daher sollten Geräte und Leiterplatten, in denen sich hohe Edelmetallgehalte konzentrieren, sehr früh und zerstörungsfrei aus dem EAG-Strom separiert werden.

**Versorgungssicherheit:** Palladium ist in der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU enthalten [16].

### Ökonomische Aspekte

Für viele genannte Leitgeräte erfolgt eine Separation der Gerätearten aus dem allgemeinen Elektroaltgerätestrom bereits aus Gründen der Schadstoffentfrachtung (insbesondere Batterien, Toner) oder aus ökonomischen Gründen aufgrund der Hochwertigkeit der Leiterplatten, sodass der Zusatzaufwand meist gering ist.

Wenn die Altgeräte mit besonders ressourcenrelevanten Leiterplatten als Monostrom vorliegen, erfolgt üblicherweise eine (nahezu) zerstörungsfreie, meist manuelle Separation von Leiterplatten aus den Altgeräten, da ein ökonomisches Interesse an den hochwertigen Leiterplatten aufgrund des vergleichsweise hohen Gehalts an Edelmetallen besteht. Oft erfolgt auch eine Öffnung der Altgeräte zwecks Schadstoffentfrachtung. Somit entsteht kaum Zusatzaufwand für die Leiterplattenentfernung.

Tabelle 6 weist auf eventuelle Synergieeffekte zwischen Leiterplattenausbau und Schadstoffentfrachtung oder Gewinnung weiterer Wertstoffe hin und gibt stichwortartig eine

Abschätzung für den zusätzlichen Aufwand zur Separation der „Leitgeräte“ und der enthaltenen Leiterplatten.

**Tabelle 6: Bewertung des zusätzlichen Behandlungsaufwands für die Leitgeräte mit hochwertigen Leiterplatten und eventuelle Synergien mit der Schadstoffentfrachtung/Wertstoffgewinnung**

Hpts. erfasst in Sammelgruppe	Leitgeräte mit hohem Wertstoffgehalten in Leiterplatten	Synergie mit Schadstoffentfrachtung / Wertstoffen	Zusätzlicher Aufwand (+ kein/geringer Aufwand, o mittlerer Aufwand, - hoher Aufwand)	
SG 1, SG 4	Smarte Geräte	Kühlgeräte: FCKW/KW	In Kühlgeräten: bereits eigene Sammelgruppe und individuelle Identifikation und Behandlung. Daher geringer Mehraufwand. In Großgeräten: Separation aus Containeranlieferung erforderlich. Bisher keine Zerlegung vor Großschredder. Daher relativ hoher Aufwand, jedoch zunächst sehr geringe Mengen. Siehe auch <i>Hinweis 1</i> unter der Tabelle.	+  o
SG 2	Flachbildschirm	Hg Wertstoff: PMMA	Separation der Bildschirmgeräte ohne Zusatzaufwand. Sie erfolgt ohnehin aufgrund der unterschiedlichen Behandlungswege. Leiterplatten-Entnahme im Zuge der Zerlegung zwecks Hg-Entfrachtung und Gewinnung der PMMA-Scheibe ohne relevanten Zusatzaufwand. Im Falle von LED-Hintergrundbeleuchtung Synergie mit Gewinnung der PMMA-Scheibe.	+
	Laptop, Tablet	Hg, Akku, Knopfzelle; Akku	Im Vergleich zur Ausgangslage kein relevanter Zusatzaufwand.	+
SG 4, SG 5	Server	Knopfzelle	Kein Zusatzaufwand im Vergleich zur Ausgangslage.	+
	PC	Knopfzelle	Aufgrund der Hochwertigkeit bereits derzeit häufig Separation von PCs. Durch separate PC-Behandlung höhere Erlöse möglich [9]. Siehe auch <i>Hinweis 1</i> unter der Tabelle.	+/o
	Laserdrucker	Tonerkartusche	Separation erfolgt bereits in vielen EBA nach Aussage von Teilnehmern beim 2. AG 5-Treffen	+
SG 5	Mobiltelefon, Smartphone Digital-/ Video- kamera DVD/CD-Player mobil Navigationssystem Videospielkonsole	Akku	Teilweise erfolgt bereits jetzt eine Separation der Geräte aus der SG 5 über manuelle Entnahme der Geräte auf einem Förderband. Ansonsten entsteht einmalig Aufwand zur Umstellung des Verfahrens. Im laufenden Betrieb wird von geringem Zusatzaufwand ausgegangen.	+/o

Hpts. erfasst in Sammelgruppe	Leitgeräte mit hohem Wertstoffgehalt in Leiterplatten	Synergie mit Schadstoffentfrachtung / Wertstoffen	Zusätzlicher Aufwand (+ kein/geringer Aufwand, o mittlerer Aufwand, - hoher Aufwand)	
	Router	Wertstoff: Kunststoff	In der Regel Zusatzaufwand zur Separation. Erlösmöglichkeiten für Leiterplatten und Kunststoffe. Siehe <i>Hinweis 2</i> .	o/+
	Festplatte	Wertstoff: Nd-Magnet (siehe Behandlungsanforderung )	Festplatten teilweise bereits separiert. Zusatzaufwand zur Leiterplattendemontage überkompensierbar durch Erlösmöglichkeit für Leiterplatte, Aluminium(gehäuse). Siehe <i>Hinweis 3</i> unter der Tabelle.	+/o

**Hinweis 1: Großgeräte:** Durch die Neukonfiguration der Sammelgruppe 4 (Großgeräte) ab Dezember 2018 wird deren Heterogenität, auch in Bezug auf deren Wert und Edelmetallgehalt, steigen. Erstmals werden neben den klassischen Haushaltsgroßgeräten (z. B. Waschmaschinen, Geschirrspüler) relevante größere Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik (z. B. PCs, Server, große Drucker, Kopierer) anzutreffen sein. Daher ist davon auszugehen, dass künftig viele Betriebe bereits aus diesem Anlass eine Separation besonders werthaltiger Geräte aus SG 4 einführen werden.

**Hinweis 2: Router:** Router für die Nutzung in privaten Haushalten bestehen in der Regel aus nur drei Hauptteilen: Kunststoff-Deckel und -Unterteil sowie Leiterplatte der Klasse II. Sowohl Kunststofffraktion (ABS bei den Untersuchungen von Wolf und Brüning [9]) als auch Leiterplattenfraktionen liegen vor, sobald die Leiterplatte gelöst ist. Router sind aufgrund geringer Demontagezeiten (geringe Anzahl an Schrauben) und der möglichen Erlöse für Leiterplatten und Kunststoffe für die händische Demontage interessant [9].

**Hinweis 3: Festplatten:** Ein Entsorgungsfachbetrieb gab an, dass Festplatten häufig aus PCs separiert werden, öfter werde auch die (hochwertige) Leiterplatte aus diesen manuell in einigen Sekunden separiert [11]. Laut Manhart et al. werden in Industrieländern Festplatten häufig geschreddert [21].

In einem Zerlegeversuch des Öko-Instituts in Ghana im Jahr 2013 an 100 3,5 Zoll-Festplatten aus Elektroaltgeräten [21] dauerte die Demontage einer Leiterplatte von der Festplatte durchschnittlich 21 Sekunden + 20 % für allgemeine Arbeiten (Werkzeug bereit legen etc.) = 25 Sekunden. Die Erlösmöglichkeit für die Leiterplatte und die entfrachtete Festplatte (z. B. 0,38 €, siehe Tabelle 16 in Abschnitt 4.1.4) hängt von den Tagespreisen der Fraktionen ab. Je nach Optimierung der Demontagezeit kann die Demontage der Leiterplatte somit kostenmäßig fast gleichwertig zur Nicht-Zerlegung der Festplatte sein (z. B. 0,14 € versus 0,20 € Erlösmöglichkeit minus Zerlegekosten, siehe Tabelle 16).

Es besteht eine Synergie von Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2: mit Behandlungsanforderung 7, denn die manuelle Zerlegung der Festplatte ist die Voraussetzung für die Gewinnung der seltenerdhaltigen Magnete (Nd-Magnete).

**USB-Sticks** wurden nicht in die Liste der Leitgeräte aufgenommen, denn ihre sehr geringe Größe erschwert ihre Separation aus einem gemischten Gerätestrom bzw. macht sie sehr aufwändig.

### Weiterer Regelungsbedarf

Definition „schonender Grobaufschluss“ [für Behandlungsanforderung 2: ]

In Bezug auf Leiterplatten ist unter einem schonenden Grobaufschluss ein Aufschlussverfahren zu verstehen, bei dem der Altgeräteverbund aufgetrennt wird, aber die Leiterplatten im Altgerät nicht wesentlich zerkleinert werden und die darauf befindliche Bestückung zum großen Teil nicht abgetrennt wird.

Normung: Überarbeitung von DIN 66399 „Vernichten von Datenträgern“

Siehe hierzu die Ausführungen zu Behandlungsanforderung .

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen der 50625-Serie zur Demontage und Schadstoffentfrachtung machen derzeit keine Vorgaben zur Qualität der Separation von Leiterplatten.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die LAGA-Mitteilung M 31 B [7] sowie die Abfallvorschriften der Nachbarländer Österreich und Schweiz enthalten einige Vorschriften bezüglich Leiterplatten, jedoch keine strikten Grenzwerte.

**LAGA-Mitteilung M 31 B:** In der Mitteilung [7] sind folgende Ausführungen zur Art der Separation von Leiterplatten enthalten:

- ▶ (1.4.3) Bei Leiterplatten kann von einer manuellen Demontage abgesehen werden, sofern der Nachweis erbracht wird, dass keine Emissionen frei werden und keine Schadstoffe in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden. Bauteile dürfen nicht zerstört werden.
- ▶ (2.1.5.1) Bei der Behandlung von Kühlgeräten sind Leiterplatten vor einer mechanischen Zerkleinerung „zerstörungsfrei zu entnehmen“.
- ▶ (2.4.2) Bei Großgeräten erfordert die Entfernung von Leiterplatten einen hohen Anteil manueller oder teilautomatisierter Tätigkeit.
- ▶ (2.7.2.3) Die Separation hochwertiger Leiterplatten erfolgt i.d.R. (ohne oder mit vorherigem grobem Voraufschluss) manuell vor einer mechanischen Zerkleinerung. Ansonsten sind mechanische Separationsverfahren möglich, sofern Leiterplatten als identifizierbarer Stoffstrom anfallen und keine Schadstoffverfrachtung stattfindet.

**Datenschutz:** Bezüglich der Leiterplatten der Festplatten sind die Vorschriften zur Datenvernichtung nach dem Datenschutzrecht zu beachten. In der Regel wird DIN 66399 „Vernichten von Datenträgern“ angewendet, siehe Abschnitt „Bestehender Rechtsrahmen“.

**Kritische Rohstoffe:** Die Metalle der Platingruppe, darunter Palladium, sind in der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU von 2017 enthalten [16]. Im Aktionsplan zum Kreislaufwirtschaftspaket [22] erkennt die EU-Kommission an, dass kritische Rohstoffe häufig in elektronischen Geräten vorkommen und dass die Herausforderung ihrer verstärkten Verwertung bewältigt werden muss. Daher „legt die Kommission den Mitgliedstaaten nahe, das Recycling von kritischen Rohstoffen zu fördern“.

### **Position AG und AK**

Auf dem 2. Treffen der AG 1 Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile (19.5.2017) gab es grundsätzliche Zustimmung zu den Anforderungen und zur Tabelle der Leitgeräte. Folgende Hinweise wurden gegeben:

- ▶ Die Tabelle der Leitgeräte sollte nicht abschließend sein und bei Veränderungen regelmäßig angepasst werden. Sie könnte in einem fortzuschreibenden Anhang platziert werden.
- ▶ Neben der „manuellen“ Separation sollten auch fortschrittliche „automatische“ Verfahren berücksichtigt werden.
- ▶ MiniDisc-Spieler (siehe Tabelle 5) waren nur kurzzeitig auf dem Markt. Sie wurden daher nicht in die Liste der Leitgeräte aufgenommen.

Die Empfehlungen für die Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2: wurden im AK nicht diskutiert aufgrund der Zustimmung auf dem AG 1-Treffen.

### Spezifische Begründungen

**Ausnahme für Leiterplatten auf Festplatten:** Eine Entnahme nahezu unbeschädigter Leiterplatten ist nur aus Festplatten möglich, die nicht aus Datenschutzgründen komplett geschreddert wurden. Technisch gesehen ist denkbar, dass die Datenvernichtungsfirmen die Leiterplatten vor dem Schreddern von der Festplatte demontieren. Jedoch steht gegebenenfalls eine solche Vorgehensweise im Konflikt mit den zeitlichen Vorgaben der Datenvernichtung, nach DIN 66399 innerhalb von 24 Stunden bzw. sofort nach Erhalt. Daher gilt die Anforderung für Festplatten, die aus Datenschutzgründen geschreddert werden, nur, sofern es die zeitlichen Vorgaben an die Datenvernichtung erlauben.

**Behandlungsanforderung 3:** Separation einer reinen Leiterplattenfraktion von mindestens 4 Gew.-% des Gesamtinputs FBS-Geräte und Zuführung zu einer Verwertung, bei der enthaltene Edelmetalle und Kupfer zurückgewonnen werden

**Fortschreibung:** Nach 3 Jahren: Prüfung der Einführung weiterer Quoten für Leiterplattenseparation (Klassen 1 und 2) der Kategorien 1 (Wärmeüberträger), 4 (Großgeräte), 5 (Kleingeräte) und 6 (Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte).  
Anschließend alle 5 Jahre: Aktualisierung der Quote(n).

#### Adressat:

EBA und FBA

#### Monitoring:

Nenner der Quote: Bestimmung des Inputs der Flachbildschirme (Teilmenge der Sammelgruppe 2) pro Jahr durch Verwiegung.

#### Zähler der Quote:

- Verwiegung des Gewichts der separierten Leiterplatten aus den Flachbildschirmen pro Jahr. Dazu sind die Leiterplattenfraktionen aus den Flachbildschirmen von denen weiterer EAG-Inputfraktionen getrennt zu halten. Dies setzt bei der mechanischen Behandlung einen chargenweisen Durchsatz der Flachbildschirme voraus.
- Alternativ ist der spezifische Anfall von Leiterplatten pro Flachbildschirm-Input in einer Behandlungskampagne nachzuweisen, jährlich sowie wenn Änderungen an Verfahren bzw. Input auftreten.

Um ein Monitoring der Behandlungsanforderung 2 zu unterstützen, sind

- die (fast) unbeschädigten Leiterplattenfraktionen (manuell oder nach schonendem Grobaufschluss) und
- die zerkleinerten Leiterplattenfraktionen (nach mechanischer Behandlung) getrennt zu erfassen und auszuweisen.

Perspektivisch: Sofern bei der Revision Quoten für weitere Kategorien eingeführt werden, ist das Monitoring auf diese Kategorien auszuweiten und analog per Verwiegung pro Jahr bzw. jährliche Behandlungskampagne durchzuführen. Nur Leiterplattenklassen 1 und 2.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Bei Flachbildschirmen mit Hg-Hintergrundbeleuchtung: gering. Ansonsten gering bis mittel, für oLED ggf. hoch. Synergie mit Behandlungsanforderung 22

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**Bestehender Rechtsrahmen**

Anlage 4 ElektroG, Nr. 1c) schreibt die Separation von Leiterplatten größer als 10 cm<sup>2</sup> aus sonstigen Altgeräten vor. Vorgaben zum Zeitpunkt innerhalb des Behandlungsprozesses bzw. zu einem zulässigen Zerkleinerungsgrad der Leiterplatten werden nicht gemacht.

**Status Quo**

Eine Separation der Leiterplatten aus Flachbildschirmen erfolgt je nach Anlagenkonzeption und Behandlungskette unterschiedlich, z. B. als Folgeaktivität der erforderlichen Schadstoffentfrachtung manuell oder in den nachgeschalteten mechanischen Aufbereitungsschritten.

In der mechanischen Aufbereitung werden üblicherweise nicht nur Flachbildschirme behandelt, sondern auch andere Altgeräte.

**Mengenpotenzial**

Leiterplatten kommen in allen Flachbildschirmgeräten vor. Sie sind hochwertig und enthalten Edel- und NE-Metalle (LP-Klasse I und II).

LCD-Fernseher enthalten zwischen 6 und 11 Gew.-% Leiterplatten, LCD-Monitore zwischen 4 und 8,5 Gew.-% [9] (in Auswertung der Ergebnisse einer Tiefenerlegung im IUTA Entsorgungszentrum aus dem Jahr 2009), [23-26].

OLED TV-Geräte sind ein zunehmender Stoffstrom (siehe Ausführungen in Abschnitt 4.2.1). Nach Wolf et al. können oLED-Bildschirmgeräte bspw. 11 Gew.-% Leiterplatten enthalten [9]. Bei dieser Bildschirmart werden Leiterplatten in Zukunft vermehrt in Form von (leichten) bedampften Folien verbaut werden.

Weitere Gerätearten:

Angaben zu erreichbaren Mengen von separierten Leiterplatten für die ab Dezember 2018 geltenden Sammelgruppen liegen nicht vor. Für bisherige Gerätegruppen/ Sammelgruppen wurden dem UBA die vorübergehenden Zielwerte von WEEELABEX für Benchmarks, ausgehend von Daten aus europäischen Nachbarländern, zur Verfügung gestellt [27], siehe Tabelle 7. Eine UBA-Umfrage im Herbst 2016 bei den Erstbehandlungsanlagen, die im AK EAG-Behandlungsanforderungen vertreten waren, ergab Werte zwischen 1 kg/t Input für die Haushaltsgroßgeräte und 26 kg/t für Klasse 3-Leiterplatten in Sammelgruppe 3 (nach ElektroG 1: Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik), siehe Tabelle 7.

Diese Daten dienen als Anhaltspunkte. Insgesamt ist bei der Ableitung von Quotenzielwerten die Berücksichtigung von Fällen wie der Behandlung von vorentfrachtetem Material oder von größeren Mengen an Sonderchargen zu diskutieren. Eine belastbare Ableitung einer Leiterplattenquote im Sinne einer Behandlungsanforderung ist derzeit nur für Flachbildschirme möglich.

**Tabelle 7: Mengen der Leiterplattenfraktionen pro Sammelgruppe. Vorläufige Zielwerte aus der WEEELABEX-Zertifizierung [27] und Ergebnisse der UBA-Umfrage bei Erstbehandlern**

	WEEELABEX: Vorübergehende Zielwerte für Benchmarks [in kg Leiterplattenfraktion pro Tonne Input]		
	Europa	Frankreich	Italien
Haushaltsgroßgeräte	1,0 kg/t	1,6 kg/t	0,7 kg/t
Haushaltskleingeräte	19 kg/t	52 kg/t	19 kg/t
CRT-Bildschirmgeräte	56 kg/t	56 kg/t	56 kg/t
Sammelgruppen vor 2018	Daten von 5 Erstbehandlern der UBA-Umfrage [in kg Leiterplattenfraktion pro Tonne Input]		
	LP-Klasse 1	LP-Klasse 2	LP-Klasse 3
SG 1 Haushaltsgroßgeräte		Firma 1: 1 kg/t	Firma 2: 0,9 kg/t
SG 3 (ElektroG 1 <sup>1</sup> )	7,5 kg/t	7,5 kg/t	26,5 kg/t
SG 5 (ElektroG 1 <sup>2</sup> )	3,5 kg/t	3,5 kg/t	
SG 5 (ElektroG 2 <sup>3</sup> )	Ganze LP: 5 kg/t		LP-Teile: 4,9 kg/t

### Ökologische Aspekte/Motivation

Siehe Ausführungen zur Behandlungsanforderung 1 und zur Behandlungsanforderung 2 zur hohen Umweltrelevanz der in den Leiterplatten enthaltenen Edelmetalle. Bei den Flachbildschirmen leisten die Edelmetalle, obwohl massenmäßig nur im Milligramm-Bereich enthalten, relevante Beiträge zum Treibhauspotenzial der Geräteherstellung in einer Größenordnung von rund 100 bis 200 kg CO<sub>2</sub> eq. pro t Gerät, siehe Tabelle 5. Die Umweltrelevanz ist etwas geringer als für die Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2 zu bewerten, da die Behandlungsanforderung 3 lediglich die Flachbildschirme umfasst und somit ein insgesamt geringeres Mengenpotenzial als die Leitgeräte.

Aufgrund der höheren Umweltrelevanz sollten sich perspektivische Leiterplattenquoten für weitere Kategorien auf die Leiterplattenklassen 1 und 2 beschränken.

### Ökonomische Aspekte

Zumindest bei Hg-haltigen Flachbildschirmen erfolgt eine Öffnung der Altgeräte zwecks Schadstoffentfrachtung. Somit kann die Leiterplatten-Entnahme ohne relevanten Zusatzaufwand erfolgen. Es bestehen Erlösmöglichkeiten für die Leiterplattenfraktion.

Bei Hg-haltigen und Hg-freien Flachbildschirmen besteht eine Synergie mit Behandlungsanforderung 22 (Separation der PMMA-Scheibe).

<sup>1</sup> Sammelgruppe 3 nach ElektroG 1: Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik

<sup>2</sup> Sammelgruppe 5 nach ElektroG 1: Haushaltskleingeräte und weitere Gerätearten (wie Werkzeuge, Spielzeuge), jedoch ohne Informations- und Telekommunikationsgeräte und Geräte der Unterhaltungselektronik.

<sup>3</sup> Sammelgruppe 5 nach ElektroG 2: Haushaltskleingeräte, Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik und weitere Gerätearten (wie Werkzeuge, Spielzeuge).

Die Zerlegung und das Erreichen der Leiterplatten aus oLED-Geräten ist als aufwändiger einzuschätzen, wenn sie Leiterplatten in Form von bedampften Folien enthalten, die im ganzen Gerät verteilt und teilweise wie eingegossen vorliegen nach Aussagen von Teilnehmern beim 2. AG 1-Treffen.

Da die Behandlungsanforderung 3 keine manuelle Zerlegung vorschreibt und somit auch zerkleinerte und mechanisch separierte Leiterplattenfraktionen eingerechnet werden können, ist auch bei den Hg-freien Flachbildschirmen (und perspektivisch weiteren Sammelgruppen) ein geringer Zusatzaufwand für die Leiterplattenfraktion zu erwarten. Hinzu kommt der Monitoringaufwand.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Definition „Leiterplatte“: Der Begriffsumfang der „Leiterplatte“ ist vor dem Hintergrund neuer technischer Entwicklungen wie folienartiger, sehr leichter Leiterplatten (s.o., OLED-TV) abzugrenzen.

### **CENELEC**

Die CENELEC EN 50625-2-2 und TS 50625-3-3 zur Behandlung von Flachbildschirmen machen keine Vorgaben zur Quantität der Separation von Leiterplatten aus Flachbildschirmen.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Zur LAGA-Mitteilung M 31 B [7] siehe allgemeine Ausführungen zu Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2. Die Mitteilung enthält einige Ausführungen zur Behandlung von Leiterplatten aus Flachbildschirmen: Bei der Behandlung von Flachbildschirmgeräten werden die enthaltenen Leiterplatten in der Regel im Zuge der Schadstoffentfrachtung manuell separiert (2.7.2.3). Bei der teilautomatisierten Zerlegung können nach der Entfernung der Hg-Hintergrundbeleuchtung die erhaltenen Gerätereste (inkl. Leiterplatten) manuell und/oder mechanisch weiterbehandelt werden. Im Allgemeinen ist eine Separierung von Bestandteilen wie den Leiterplatten möglich. Die enthaltenen rund 10 % Leiterplatten sollen möglichst sortenrein wiedergewonnen und recycelt werden (2.2.2). Position AG und AK

Auf dem 2. Treffen der AG 1 Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile (19.5.2017) gab es grundsätzliche Zustimmung zur Quote für Leiterplatten aus Flachbildschirmen. Folgende Hinweise wurden gegeben:

- ▶ Anlässlich der WEEELABEX-Aktivitäten gibt es Richtwerte für den spezifischen Anfall von Leiterplatten (pro Tonne EAG) für weitere Sammelgruppen (vor 2018), die dem UBA im Nachgang zur Verfügung gestellt wurden, siehe Tabelle 7.
- ▶ Leiterplatten werden in Zukunft vermehrt in Form von (leichten) Folien verbaut werden (insbesondere OLED-TV und Tablets/Notebooks), sodass die Definition „Leiterplatte“ zu präzisieren ist. Sie sind im Vergleich zu Standard-Leiterplatten sehr leicht, ihre Separation wird als kaum möglich bezeichnet, da im ganzen Gerät verteilt und teilweise wie eingegossen.
- ▶ OLED TV Geräte weisen einen deutlich anderen Aufbau als Flachbildschirmgeräte auf. Zerlegung und Erreichen der Leiterplatten aufwändig.

Im AK erfolgte aufgrund der Zustimmung in AG 1 keine weitere Diskussion.

Kommentierung durch den „Workshop Erstbehandlung“, einen Zusammenschluss mehrerer deutscher EAG-Recyclinganlagen, vom Juli 2017: Bei der Definition der Zielwerte in

Gewichtsprozent der Altgeräte ist die technische Entwicklung zu beachten. Der anvisierte Zielwert von 4 % sei bereits heute bei einigen Flachbildfernsehern nicht mehr einzuhalten durch die Minimierung der werthaltigen Bauteile im Verhältnis zu den größer werdenden Geräten. Dieser technische Hinweis wurde aufgegriffen durch die Ergänzung der Revisionsklausel für die Zielwerte.

#### 4.1.2 Möglichst vollständige Lenkung weiterer edelmetallhaltiger Fraktionen in die Edelmetallrückgewinnung

Aufgrund der Umweltrelevanz der Edelmetalle ist ihre möglichst vollständige Rückgewinnung anzustreben. Bei der mechanischen EAG-Behandlung verteilen sich die Edelmetalle auf verschiedene Fraktionen, aus denen nicht immer eine Rückgewinnung erfolgt. Optimale Zielformulierung wäre die Festsetzung eines Mindest-Edelmetallrückgewinnungsgrads, z. B. 90 %, über die Behandlungskette. Dies scheitert jedoch, da die Basis für solch eine Quote, die Edelmetallmenge im EAG-Input, nicht bestimmbar ist. Da im Falle der Edelmetalle bei den EAG-Behndlern ein wirtschaftliches Eigeninteresse an einer hohen Rückgewinnung herrscht, kann ein Ansatz gewählt werden, der auf strikte Zielwerte verzichtet und stattdessen auf Eigenmotivation der Erstbehandler durch die Pflicht zur kontinuierlichen Auseinandersetzung mit den betrieblichen Edelmetallverlusten setzt.

#### Behandlungsanforderung 4: Kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung

##### Beschreibung:

Ziel ist die betriebliche Optimierung der Lenkung der im EAG-Input enthaltenen Edelmetalle in die Edelmetallrückgewinnung.

Im Turnus von jeweils 3 Jahren ist durch den Erstbehandler ein Verbesserungszyklus zu durchlaufen:

1. Dokumentation aller potenziell betroffenen Outputfraktionen über repräsentative Analysen auf Au, Ag, Pd, Sn über die gesamte Behandlungskette.
2. Erstellung einer betriebliche Edelmetallbilanzierung oder Übersicht über die Edelmetallverluste und die betroffenen Fraktionen auf Basis der Analysen.
3. Entwicklung von Verbesserungsmöglichkeiten für die ermittelten Defizite/ Verluste.

Erster Turnus: Formulierung einer Zielsetzung und eines Handlungsleitfadens, um den Anteil der Lenkung in die Edelmetallrückgewinnung kontinuierlich zu erhöhen.

Ab dem zweiten Turnus: Überprüfung der Zielerreichung, Fortschreibung der Zielsetzung und des Handlungsleitfadens.

##### Querverweis:

Die kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung ist auch als Teil des Behandlungskonzepts, siehe Kapitel 4.7.1, denkbar.

##### Adressat:

Ausgenommen sind Erstbehandler mit ausschließlich manueller, d. h. verlustfreier Behandlung der Leiterplatten.

Verpflichtet ist der erste Behandler mit mechanischen Prozessschritten zur Behandlung von Leiterplatten: verantwortliche Stelle auch für die nachfolgende Behandlungskette.

Folgebehandler/ Rückgewinner: Pflicht, die entsprechenden Daten zugänglich zu machen.

##### Monitoring:

Alle drei Jahre Vorlage folgender Dokumente bei Zertifizierung: Analysen potenziell betroffener Fraktionen, betriebliche Edelmetallbilanzierung oder Übersicht über die Edelmetallverluste, zeitliche Entwicklung der Edelmetallverluste, Zielformulierung, Handlungsleitfaden mit Maßnahmen zur Steigerung der Edelmetallrückgewinnung.

##### Ökonomischer Aufwand für Behandler:

Gering (z.B. für Entsorgungsfachbetriebe, CENELEC-zertifizierte EBA) bis Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Bestehender Rechtsrahmen**

ElektroG: Entsprechend § 20 Absatz 2 ElektroG hat die Behandlung von Elektroaltgeräten nach dem Stand der Technik im Sinne des § 3 Absatz 28 KrWG zu erfolgen. Entsprechend Anlage 4 Nr. 1c) ElektroG sind bestimmte Leiterplatten aus Elektroaltgeräten zu entfernen. Darüber hinaus enthält das ElektroG keine spezifische Anforderung an die Rückgewinnung der enthaltenen Edelmetalle.

EfbV: Zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe nach Entsorgungsfachbetriebeverordnung sind verpflichtet, ein Betriebstagebuch (§ 5 EfbV) mit allen Informationen zum Nachweis einer ordnungsgemäßen Bewirtschaftung der Abfälle zu führen. Hierzu gehören auch Angaben über den Verbleib der behandelten Abfälle und Ergebnisse von stoffbezogenen Kontrolluntersuchungen. Werden Dritte beauftragt (§ 7 EfbV), sind hierfür ebenfalls Entsorgungsfachbetriebe auszuwählen oder Betriebe, die sorgfältig ausgewählt werden und ausreichend kontrolliert werden. Insbesondere ist verbindlich zu regeln, wo die Abfälle verbleiben, und dem Entsorgungsfachbetrieb vertraglich die Befugnis zur Kontrolle der fach- und sachgerechten Durchführung der beauftragten Tätigkeiten einzuräumen. Der beauftragte Dritte ist verpflichtet, dem Entsorgungsfachbetrieb Kopien der erforderlichen Nachweise zu überlassen.

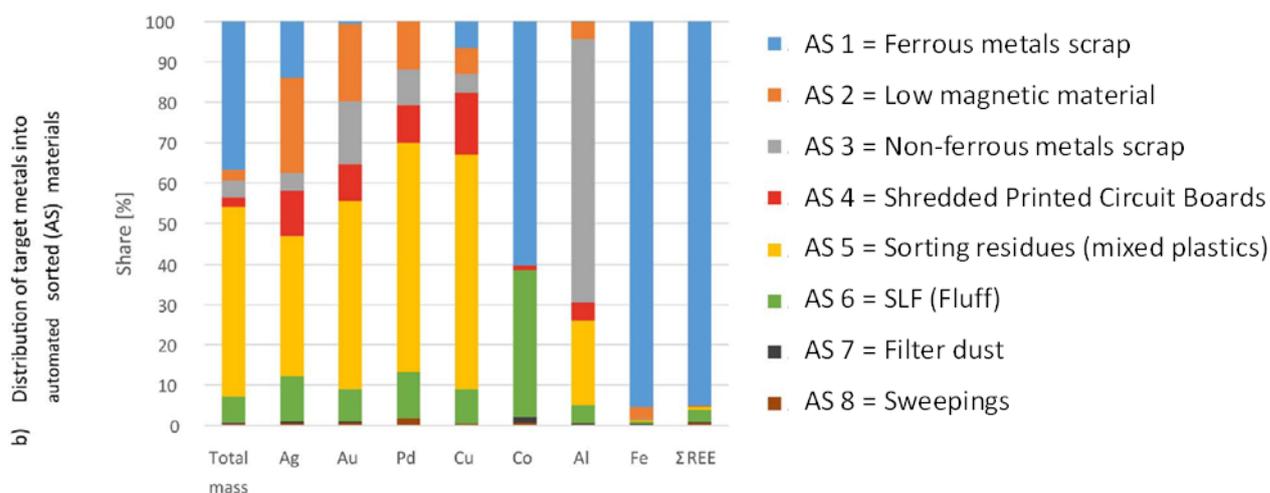
**Status Quo**

Strategien der Erstbehandler: Die Erstbehandler streben in der Regel aus ökonomischen Gründen eine gute Verwertung edelmetallhaltiger Fraktionen an. Damit erzielen die Behandler je nach eingesetzter Technik, Geschäftsmodell und Analysentiefe der erzeugten Fraktionen unterschiedliche Gesamtrückgewinnungsgrade. Ein strukturierter Optimierungsprozess der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen über die Behandlungskette findet in vielen Fällen nicht statt.

Verteilung der Edelmetalle: Je nach Ausrichtung der Behandler und der EAG-Inputqualitäten erfolgt verstärkt eine Separation der Leiterplatten auf manuellem Wege (siehe auch Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2 für hochwertige Leiterplatten) oder eher eine mechanische Behandlung.

Fraktionen, in die die Edelmetalle bei der mechanischen Behandlung verschleppt werden, sind insbesondere die nichtmetallische Rest-/Kunststofffraktion, das Feinkorn und der Staub, siehe Abbildung 5. In UPgrade [20] wurde die Verteilung der Edelmetalle bei der mechanischen EAG-Behandlung, der eine manuelle Entfrachtung voraus ging, bilanziert, siehe Abbildung 8: Nur etwa 10 % der Metalle Silber, Gold und Palladium fand sich in der Leiterplattenfraktion, während rund die Hälfte in die Sortierreste (gemischte Kunststoffe) oder den Filterstaub gelangte.

**Abbildung 8: Edelmetall-Mengenströme im Batchversuch der mechanischen EAG-Behandlung [20]**



Die mechanische Aufbereitung kann aufgrund der Verschleppung von Edelmetallen im Zerkleinerungsprozess zu Metallverlusten führen, die Literatur nannte vor mehreren Jahren Rückgewinnungsgrade der Edelmetalle von lediglich 24 % bzw. 70 %, siehe Ausführungen zu Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2: .

Seitdem wurden bei der Behandlung der EAG Verbesserungen eingeführt. Teilweise werden neben der Leiterplattenfraktion auch weitere edelmetallhaltige Fraktionen zur Kupferhütte gegeben, wie z. B. Staub oder feinkörnige Eisenfraktionen. Weitere Fraktionen, wie z. B. die nichtmetallische (Kunststoff-) Restfraktion werden in einer Folgebehandlung weiter aufkonzentriert, z. B. durch verstärkten Einsatz nasser Sortierverfahren.

Es ist keine Übersicht verfügbar, wie weit die Lenkung der edelmetallreichen Fraktionen in die Rückgewinnung unter den EBA verbreitet ist. Auch Daten über die durchschnittlich erreichten Edelmetall-rückgewinnungsgrade liegen nicht vor. Eine grobe Abschätzung aus Reihen der Erstbehandler ergab rund 80 bis 85 % beim 1. AG 1-Treffen.

### Mengenpotenzial

Abschätzung für Deutschland: In RePro [17] wurden die Massenströme für 10 ressourcenrelevante Metalle bei der Sammlung, Behandlung und Rückgewinnung aus Elektroaltgeräten in Deutschland für das Jahr 2020 für drei Szenarien modelliert, siehe Tabelle 8.

**Tabelle 8: Modellierung der Goldmassenströme im Jahr 2020 für die EAG-Entsorgung in Deutschland für drei Szenarien [17]**

(gemäß Abbildung 171 aus Quelle [17])

In kg/a	Gold		
	BAU	OPT	OPT OPT
Menge in den erfassten EAG	1.423	4.215	4.215
Verluste bei Behandlung	237	1.083	203
Verluste bei Rückgewinnung	60	156	201
<b>Summe Verluste</b>	<b>297</b>	<b>1.239</b>	<b>404</b>
Summe Verluste (in %)	21 %	29 %	10 %

- Szenario BAU (Business-as-usual): Sammlung und Behandlung entsprechend dem Status quo 2014.
- Szenario OPT: Optimierte Sammlung und optimierte Behandlung für einige Geräte/Komponenten
- Szenario OPT OPT: Optimierte Sammlung und optimierte Behandlung für alle relevanten Geräte/ Komponenten

Mit den Vorgaben zur Stärkung der EAG-Erfassung durch das ElektroG 2 und mit Blick auf das Sammelziel 2019 von 65 % kann mit einer verstärkten Erfassung auch der leiterplattenhaltigen EAG und somit einem steigenden Potenzial an Edelmetallen in der EAG-Behandlung gerechnet werden. Die RePro-Modellierung geht im Szenario „OPT“ für 2020 mit optimierter EAG-Erfassung von Goldverlusten bei der EAG-Behandlung und -Rückgewinnung von 29 % aus, die sich durch eine optimierte Behandlung („OPT OPT“) um rund 800 kg Gold auf 10 % verringern lassen [17].

Werden als derzeitiger durchschnittlicher Edelmetallrückgewinnungsgrad die Schätzung der Erstbehandler von 80 % und die in RePro prognostizierten optimierten Erfassungsmengen zugrunde gelegt, ließen sich bei einer Steigerung der Rückgewinnung in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess von 80 % auf 90 % rund 400 kg Gold, 1.800 kg Silber und 100 kg Palladium pro Jahr zusätzlich zurückgewinnen, siehe Tabelle 9.

### Ökologische Aspekte/Motivation

Aufgrund der hohen Umweltrelevanz der Edelmetalle hätte eine Steigerung der Rückgewinnung von z. B. 80 % auf 90 % einen hohen Umweltentlastungseffekt. Da die genaue Höhe des aktuellen Durchschnitts-Rückgewinnungsgrads nicht bekannt ist, kann nur eine sehr grobe Schätzung erfolgen, die ein Treibhauspotenzial der zusätzlich zurückgewinnbaren Edelmetalle von fast 6.000 t CO<sub>2</sub> eq. pro Jahr ergibt, siehe Tabelle 9.

**Tabelle 9: Treibhauspotenzial der zusätzlich in Deutschland aus EAG rückgewinnbaren Edelmetalle bei Steigerung des Rückgewinnungsgrades von 80 % auf 90 %, Ausgangsdaten: Edelmetallgesamtmenge aus RePro-Szenario OPT [17], GWP der Metalle aus [10]**

	Treibhauspotenzial der Metalle aus EAG		
	Gold	Silber	Palladium
Menge in den erfassten EAG 2020, Szenario Optimierte Sammlung [17]	4.215 kg/a	18.880 kg/a	1.154 kg/a
Zusätzlich zurückgewinnbare Menge bei Steigerung des Rückgewinnungsgrads von 80 % auf 90 %	rund 400 kg/a	rund 1.800 kg/a	rund 100 kg/a
Spezifisches Treibhauspotenzial des Metalls [10]	12.500 kg CO <sub>2</sub> eq. pro kg Metall	196 kg CO <sub>2</sub> eq. pro kg Metall	3.880 kg CO <sub>2</sub> eq. pro kg Metall
Treibhauspotenzial der zusätzlich zurückgewinnbaren Metalle	5.000 t CO <sub>2</sub> eq. pro a	353 t CO <sub>2</sub> eq. pro a	388 t CO <sub>2</sub> eq. pro a

### Ökonomische Aspekte

Chancerel zeigte am Beispiel von Mobiltelefonen, dass für edelmetallhaltige Elektroaltgeräte die ökonomische und die ökologische Motivation für eine möglichst gute Rückgewinnung weitgehend im Einklang sind. Der Gold- und Palladiumgehalt von Mobiltelefonen machen zusammen sowohl rund 70 % der Umweltrelevanz („Environmental weight“) als auch rund 70 % des ökonomischen Wertes aus, während Kunststoffe, Kupfer und Glas mit zusammen über 80 % die massenmäßig relevantesten Materialien sind. [28]

**Edelmetallwert:** Aufgrund des hohen ökonomischen Werts der Edelmetalle ließen sich durch eine Steigerung der Rückgewinnung von z. B. 80 % auf 90 % hohe Zusatzerlöse durch Erst-, Folgebehandler und Rückgewinner realisieren. Da die genaue Höhe des aktuellen Durchschnittsrückgewinnungsgrads nicht bekannt ist, kann nur eine sehr grobe Schätzung erfolgen, die einen Marktwert der zusätzlich zu-rückgewinnbaren Edelmetalle (in Reinform) von rund 17 Mio. Euro pro Jahr ergibt, siehe Tabelle 10.

**Tabelle 10: Marktwert der zusätzlich in Deutschland aus EAG rückgewinnbaren Edelmetalle bei Steigerung des Rückgewinnungsgrades von 80 % auf 90 %**

	Wert der Metalle aus EAG		
	Gold	Silber	Palladium
Zusätzlich zurückgewinnbare Menge bei Steigerung des Rückgewinnungsgrads von 80 % auf 90 % (siehe Tabelle 9)	ca. 400 kg/a	ca. 1.800 kg/a	ca. 100 kg/a
Metallpreis (finanzen.net <sup>4</sup> ), Stand: 12.10.2017	35.139 Euro/kg	468 Euro/kg	26.512 Euro/kg
Marktwert der zusätzlich zurückgewinnbaren Metalle	14 Mio. Euro/a	0,8 Mio. Euro/a	2,7 Mio. Euro/a

<sup>4</sup> Goldpreis, Silberpreis, Palladiumpreis auf [www.finanzen.net](http://www.finanzen.net), Zugriff 12.10.2017

**Aufwand für den kontinuierlichen Verbesserungsprozess:** Um den eigenen Prozess / das Verfahren beurteilen und optimieren zu können, muss der Erstbehandler den Materialfluss der Edelmetalle über die gesamte Verfahrenskette nachvollziehen. Hierzu sind u. a. Gespräche mit Folgebehandlern und ggf. Rückgewinnungsanlagen erforderlich, um entsprechende Informationen einzuholen. Hinzu kommen Untersuchungen und Analysen der erzeugten Fraktionen für eine grobe Edelmetallbilanz. Der zeitliche und analytische Aufwand wird in den Fällen als hoch eingeschätzt, in denen bisher keine Eigenaktivitäten der EBA erfolgen.

Erst- und Folgebehandler, die Entsorgungsbetriebe sind oder über eine Zertifizierung nach CENELEC verfügen, sind bereits jetzt angehalten, die Stoffströme über die nachfolgenden Schritte zu verfolgen und intensiv mit den Folgebehandlern/ Rückgewinnern Informationen über den Verbleib der Output-Fraktionen auszutauschen, siehe Absätze zum Rechtsrahmen und zu CENELEC. Das Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung ist den nach CENELEC-Normenserie 50625 zertifizierten Betrieben bereits vertraut.

Der Austausch mit den Folgebehandlern ist auch ansonsten zur Geschäftsabwicklung erforderlich. Analysen liegen für Fraktionen, die der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden, mindestens an einer Stelle in der Behandlungskette vor. Für Fraktionen, die bisher nicht der Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden, entsteht ein Zusatzaufwand für ihre Analyse auf Edelmetallgehalte.

Insgesamt wird der Zusatzaufwand für die Behandlungsempfehlung je nach Stand der Anlagen /Verfahrensoptimierung und je nach Zertifizierungssituation als gering bis mittel eingestuft.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Nach dem Inkrafttreten einer Behandlungsverordnung könnte für die Erstbehandler ein Leitfaden als Orientierung hilfreich sein, wie sich die Aufgaben praktisch abarbeiten lassen. Z. B. welche Fraktionen als relevante Fraktionen zu untersuchen sind, wo typische Verlustquellen zu erwarten sind, wie die Lenkung in die Edelmetallrückgewinnung mit einfachen Maßnahmen verbessert werden kann, wie der erforderliche Informations- und Datenaustausch zwischen den Erst- und Folgebehandlern bzw. Rückgewinnern gelingen kann, ohne Geschäftsgeheimnisse preisgeben zu müssen etc.

Für eine Fortschreibung der Behandlungsanforderung 3 wären Festlegungen zum groben Ablauf des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und zur Klärung von Fragen, siehe Abschnitt „Position AK und AG“, sinnvoll, zum einen um vergleichbare Qualitäten der Prozesse bei den EBA zu erreichen, zum anderen um den Sachverständigen harmonisierte Prüfungskriterien mitzugeben. Hierfür käme ein Anhang der BehandV in Frage oder eine Veröffentlichung im Bundesanzeiger.

### **CENELEC**

Edelmetallrückgewinnung: Für die mechanische EAG-Behandlung enthalten die CENELEC-Normen keine Anforderungen zur Edelmetallrückgewinnung. Für die finale Verwertung von kupfer- und edelmetallhaltigen Fraktionen aus der EAG-Behandlung schreibt CENELECTS 50625-5 Mindestmetallausbeuten für die metallurgischen Prozesse in Höhe von jeweils mindestens 90 % für Kupfer, Gold, Silber und Palladium vor, siehe CENELEC-Abschnitt zu Behandlungsanforderung 5.

Kontinuierliche Verbesserung und Monitoring: Die CENELEC-Normen der Serie 50625 (siehe Tabelle 2) stellen neben technischen Anforderungen auch zahlreiche Management-Anforderungen. Dazu gehört auch der Nachweis einer kontinuierlichen Verbesserung der Aktivitäten durch entsprechende Überprüfungen und Managementprozesse und diverse Dokumentationspflichten.

Ein weiteres Prinzip ist das „Downstream Monitoring“. Die CENELEC-Normen fordern, dass der Erstbehandler seine Outputfraktionen über die Behandlungskette weiterverfolgt. Dadurch wird eine belastbare Bestimmung der Verwertungsquoten nach der WEEE-Richtlinie möglich und der Verbleib von gefährlichen Abfällen kann verfolgt werden. Insgesamt weist der Erstbehandler damit die rechtmäßige Behandlung der EAG-Fraktionen nach dem Stand der Technik nach [29].

Das in den CENELEC-Normen verankerte allgemeine Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung wird in Behandlungsanforderung 4 aufgegriffen und auf die Edelmetallrückgewinnung bezogen, welche die CENELEC-Normen (außer Norm für die finale Verwertung CENELEC TS 50625-5) nicht explizit erwähnen.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

LAGA-Mitteilung M 31 B: In der Mitteilung [7] wird beschrieben (2.7.2.3), dass zur Verringerung der Ressourcenverluste auch die bei der mechanischen Aufbereitung entstehende Feinfraktion der Kupfer- und Edelmetallrückgewinnung zugeführt wird. Vor der eigentlichen Verwertung kann eine weitere Folgebehandlung, z. B. aus nassen oder trockenen Dichttrennverfahren, zur Erzeugung metallangereicherter Fraktionen sinnvoll eingesetzt werden.

VREG Schweiz: Laut Artikel 9 des Entwurfs der Schweizer Elektroaltgeräteverordnung VREG (siehe 2.2.2) gehört zur umweltverträglichen Entsorgung der EAG nach dem Stand der Technik namentlich auch, „verwertbare Anteile, insbesondere ... metallhaltige Bestandteile wie ... Leiterplatten ... sowie seltene technische Metalle wie Gold, Palladium, ... , soweit möglich“ zu verwerten. Das BAFU soll dann Richtlinien über die Verfahren, die als umweltverträgliche und dem Stand der Technik entsprechenden Entsorgung gelten, erlassen.

SENS/SWICO Schweiz: Das Konzept der Verantwortung des Erstbehandlers für die gesamte Entsorgungskette ist auch in der Schweiz bekannt. In den Schweizer „Technischen Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ sind in den allgemeinen technischen Vorschriften auch Vorgaben für Stoffflussnachweise (siehe Kap. G.4) enthalten. Hier wird der Recyclingbetrieb verantwortlich gemacht „für den gesamten Entsorgungsprozess, von der Entgegennahme der Geräte bis zum letzten Entsorgungsprozess, resp. dem Beginn der Verwertungsprozesse“. Außerdem verpflichtet sich der Recyclingbetrieb, „für Fraktionen, die in eine externe Verarbeitung gegeben werden, einen Stoffflussnachweis beim Empfänger einzufordern. Ein Stoffflussnachweis einer weitergeleiteten Fraktion enthält den Namen und Adresse des Empfängers, die Art der Weiterbehandlung, Angaben über die dabei erzeugten Fraktionen und deren Weiterleitung.“

### **Position AG und AK**

Der Ansatz des Verbesserungsprozesses anstelle von allgemeinen verbindlichen Verfahrensanforderungen und Grenz-/Zielwerten fand auf dem 2. Treffen der AG 1 Leiterplatten vom 19.05.2017 grundsätzliche Zustimmung.

Von den Teilnehmern wurden weitere Hinweise gegeben, welche teilweise im Bericht aufgegriffen wurden:

- ▶ Verpflichtung auch für Erstbehandler mit ausschließlich manueller, d. h. verlustfreier Behandlung der Leiterplatten? Dies wurde zur Reduzierung des administrativen Aufwands bei rein manuell arbeitenden Erstbehandlern aufgegriffen, siehe „Adressat“. Verantwortlich für die Anforderung ist entsprechend der erste Betrieb mit mechanischer Behandlung der Leiterplatten (ab Grobaufschluss).

- ▶ Die Folgebehandler sollten verpflichtet werden, die Daten an den Erstbehandler zu liefern. (aufgegriffen)
- ▶ Mehrere Punkte sind zu klären, siehe Absatz „Weiterer Regelungsbedarf“:
  - Beprobung: Durch wen erfolgt sie? In welcher zeitlichen Abfolge sind Input und Output zu beproben, damit sie möglichst dieselben EAG widerspiegeln?
  - Bestehen Grenzen aufgrund von Geschäftsgeheimnissen? Möglichkeit von Kundenschutzvereinbarungen.
  - Teilweise sind auch Händler (zur Mengenkonsolidierung) zwischengeschaltet. Wie verläuft dann die Informationskette/-verpflichtung?
  - Konkretisierung der „potenziell betroffenen Fraktionen“ gewünscht.
  - Vorgaben für den Zertifizierer gewünscht, z. B. Pflicht zur Kontrolle des Handlungsleitfadens.
- ▶ Eine Gruppe von Erstbehandlern erarbeitete im Sommer 2017 einen Leitfaden bezüglich der Aufgaben eines Zertifizierers bei einer Zertifizierung einer Erstbehandlungsanlage. Sie boten an, dem UBA diesen Leitfaden zur Verfügung zu stellen, was bisher nicht erfolgt ist. Eine Integrierung in die Behandlungsverordnung würde die höchste Verbindlichkeit für alle Akteure erreichen. Alternativ wurde der Anhang „Prüflisten“ des LAGA-Merkblatts M 36 „Vollzugshilfe Entsorgungsfachbetriebe“ zur Verortung vorgeschlagen.

Hinweise auf der 3. AK-Sitzung vom 13.6.2017:

- ▶ Die Implementierung solch eines Managementprozesses könne hilfreich sein, da sicherlich nicht alle Erstbehandler die vollständige Edelmetallrückgewinnung derzeit zielgerichtet betreiben.
- ▶ Die Edelmetallseparation erfolgt häufig bei Folgebehandlern. Die Variationsvielfalt in den Folgeprozessen sei zu groß und die Kontrolle durch den Erstbehandler kaum möglich.
- ▶ Die Idee des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses kann zu einem „Behandlungskonzept“ weitergedacht werden (siehe Kapitel 4.7.2). Dieses könne auch auf die Prozesse der Schadstoffentfrachtung fokussieren. Es ließe sich gut durch die Behörden überprüfen

### **Spezifische Begründungen**

Managementanforderung: Der Ansatz, auf das ökonomische Eigeninteresse und die kontinuierliche Verbesserung der Erstbehandler zu setzen, unterscheidet sich von den sonstigen Behandlungsempfehlungen in diesem Bericht. Erste Wahl wären auch hier konkrete Ziel- oder Verfahrensvorgaben gewesen. Die als sinnvoll erscheinenden Ziel- oder Verfahrensvorgaben ließen sich jedoch aus verschiedenen Gründen nicht ausformulieren. Das Oberziel ist jeweils die möglichst vollständige Lenkung der Edelmetalle in die Edelmetallrückgewinnung.

- 1) Am nächstliegenden wäre daher die Festlegung eines Zielwerts:  
*Der Rückgewinnungsgrad der Edelmetalle bei der EAG-Behandlung muss mindestens (z. B.) 90 % betragen.*  
Eine Quote erfordert stets einen Grundwert im Nenner, auf den die Quote bezogen wird. Dieser Ansatz scheitert daran, dass sich dieser Grundwert für eine Erstbehandlungsanlage nicht bestimmen lässt. Die Metallmenge in den Inputchargen oder auch für ein Kalenderjahr kann nicht ermittelt werden. Aus den sehr heterogenen EAG-Inputchargen (z. B. angelieferte Container) sind mit vertretbarem Aufwand keine repräsentativen Analysen möglich. Daher ließ sich dieser Ansatz nicht weiter verfolgen.
- 2) Da bekannt ist, dass bei der mechanischen Behandlung Edelmetalle in verschiedene Fraktionen verteilt werden, wäre eine mögliche Anforderung:  
*Edelmetallhaltige Stäube und Feinkornfraktionen sind der Edelmetallrückgewinnung zuzuführen.*  
Hierfür wäre jedoch eine klare Definition erforderlich, ab wann eine Staub- oder sonstige Fraktion als „edelmetallhaltig“ gilt. Hierfür waren jedoch keine begründeten Werte ableitbar.
- 3) Eine weitere Möglichkeit bestünde in einer verbesserten Nachbehandlung von Fraktionen, in die Edelmetalle eingeschleppt werden:  
*Fraktionen, die nicht einer Edelmetallrückgewinnung zugeführt werden (insbesondere die nichtmetallische Restfraktion), sind einer Nachbehandlung zur Separation verbliebener Edelmetallmengen zu unterziehen.*  
Hierfür wären präzise Angaben erforderlich, in welcher Tiefe eine solche Nachbehandlung erfolgen müsste und auf welche Maximal-Edelmetallgehalte die Fraktionen abgereichert werden müssten (analog zum Maximal-PCB-Gehalt in der Feinfraktion). Hierfür waren jedoch keine begründeten Werte ableitbar. Die Unterschiedlichkeit der in den verschiedenen EBA erzeugten Fraktionen würde eine einheitliche Festlegung außerdem erschweren.

Aus diesem Grund musste ein neuer Ansatz gefunden werden. Da Edelmetalle – im Gegensatz z. B. zu Schadstoffen – einen hohen ökonomischen Wert aufweisen, ist es möglich, auf die Eigenmotivation der Erstbehandler zu setzen. Durch die Behandlungsempfehlung sollen sie in die Pflicht genommen werden, sich regelmäßig und intensiv mit ihren Edelmetallverlusten auseinanderzusetzen, die für eine Bilanzierung erforderlichen Daten zu beschaffen, auszuwerten und in Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen. Ein konkreter pauschaler Zielwert dieser Verbesserung kann und soll nicht rechtlich vorgegeben werden.

#### 4.1.3 Verwertung der Leiterplattenfraktionen nach dem Stand der Technik

Die Leiterplattenfraktionen und weiteren edelmetallhaltigen Fraktionen sind nach dem Stand der Technik zu behandeln. Es ist auszuschließen, dass diese Fraktionen in einen „informellen“ Sektor gelangen aufgrund der dort erreichten geringeren Umweltstandards und Rückgewinnungsgrade.

**Behandlungsanforderung 5:** Abgabe separierter Leiterplattenfraktionen und edelmetallhaltiger schadstoffentfrachteter Altgeräte zur metallurgischen Rückgewinnung

**nur an Anlagen:**

- 1) mit folgenden Rückgewinnungsgraden im Rückgewinnungsprozess (Zielwerte): Cu, Au, Ag, Pd je 90 %
- 2) mit Rückgewinnung von Sn, Pb, Sb in der Prozesskette
- 3) die die Anforderungen der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie unter der Industrieemissions-Richtlinie 2010/75/EU für PCDD/F-Emissionen (BVT 48) und Staub-Emissionen (BVT 37, 40-45) erfüllen

**Adressat:**

Erstbehandler und Folgebehandler als Verantwortliche für die Abgabe der Leiterplattenfraktionen an die Rückgewinnungsanlagen

**Monitoring:**

Vorlage folgender Nachweise durch den Erst- oder Folgebehandler, der die Leiterplattenfraktionen oder edelmetallhaltigen Altgerätefraktionen zur Rückgewinnung abgibt:

- Bestätigung der Rückgewinnungsanlage, dass die Anlage die Anforderungen der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichtmetallindustrie (Durchführungsbeschluss (EU) 2016/1032) an die Emissionen von PCDD/F (BVT 48) und Staub (BVT 37 sowie BVT 40 bis 45) erfüllt.
- Bestätigung von Rückgewinnungsanlagen in Deutschland, dass die Anlage über eine Genehmigung nach dem BImSchG verfügt.
- Bestätigung von Rückgewinnungsanlagen in der EU, dass die Anlage über eine Genehmigung unter der Industrieemissions-Richtlinie 2010/75/EU verfügt.
- Bei Rückgewinnung im Ausland: Nachweis einer ordnungsgemäßen Verbringung der Leiterplattenfraktion gemäß § 20 Absatz 3 ElektroG.
- Bestätigung der Rückgewinnungsgrade für Kupfer, Gold, Silber, Palladium (als Metalle (elementar) oder Legierungsmetalle (absichtlich hinzugefügt, nicht als Verunreinigung). Dies kann auch durch Vorlage des Zertifikats nach der CENELEC-Norm EN 50625-5 erfolgen.
- Bestätigung der Rückgewinnungsgrade für Blei, Zinn, Antimon in der Prozesskette. Der Betreiber des ersten Rückgewinnungsprozesses der kupfer- und edelmetallhaltigen Abfälle ist verantwortlich für die Beschaffung der benötigten Daten vom Folgerückgewinner und ihre Aggregation.

**Definitionen**

*Rückgewinnungsgrad:* Der Rückgewinnungsgrad eines Metalls wird berechnet als Prozentanteil der Masse des Metalls in den Output-Produkten, in denen das Metall als reines (elementares) Metall oder als Legierungsmetall (absichtlich hinzugefügt, nicht als Verunreinigung) oder als definierte Metallverbindung (z. B. Metallsalze) zurückgewonnen wird, jedoch nicht z. B. oder eingebunden in Schlacke, im Verhältnis zur Masse des Metalls in der leiterplattenhaltigen Inputfraktion in den metallurgischen Rückgewinnungsprozess.

*Emissionswertermittlung* für die PCDD/F-Messung: als Mittelwert über einen Probenahmezeitraum von mindestens sechs Stunden, Messung einmal im Jahr, siehe BVT 10 des Durchführungsbeschlusses (EU) 2016/1032.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Kein Zusatzaufwand

**Ökologischer Aspekt:**

Gering (bis mittel)

**CENELEC**

CENELEC TS 50625-5 (Teil 5: Spezifikation für die Endbehandlung der Fraktionen von Elektro- und Elektronik-Altgeräten – Kupfer und Edelmetalle)

- Folgende Anforderung wurde übernommen:  
Kap. 6.5: Metallausbeute: Cu, Au, Ag, Pd je mindestens 90 %
- Folgende Anforderungen wurden nicht übernommen, da teilweise nicht dem Stand der Technik entsprechend:  
Anhang B (normativ):
  - o Grenzwerte für den Abwasserstrom in die Umwelt (u. a. As 0,2 mg/l),
  - o Grenzwerte für Kaminluft (u. a. PCDD/F 0,5 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>, Staub 5 mg/Nm<sup>3</sup> als jährliche Durchschnittswerte) und
  - o Lärmgrenzwert: maximales Expositionsniveau über 8 Stunden an nächst gelegener Privatwohnung < 60 dB(A) nachts zwischen 23:00 Uhr und 7:00 Uhr.

## Bestehender Rechtsrahmen

Nach § 20 Absatz 2 ElektroG haben die weiteren Tätigkeiten zur Behandlung von Elektroaltgeräten (Erstbehandlung und weitere Behandlung) nach dem Stand der Technik im Sinne von § 3 Absatz 28 KrWG zu erfolgen.

Kupferhütten als Rückgewinnungsanlagen für leiterplattenhaltige Fraktionen fallen in den Anwendungsbereich der Industrieemissions-Richtlinie 2010/75/EU. Für diese beschreibt der Durchführungsbeschluss (EU) 2016/1032 [30] die Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) für die Nichteisenmetallindustrie. Dazu gehören technische Anforderungen zum Umwelt- und Energiemanagement sowie zur Emissionsminderung und BVT-assoziierte Emissionswerte u. a. für Luft und Wasser. Die EU-Industrieemissions-Richtlinie gilt nur innerhalb der EU.

Explizite rechtliche Vorgaben zur Erreichung bestimmter Rückgewinnungs- bzw. Recyclingeffizienzen für bestimmte Metalle aus leiterplattenhaltigen Fraktionen gibt es derzeit nicht.

Nach § 20 Absatz 3 ElektroG kann die Behandlung von Altgeräten auch außerhalb Deutschlands oder der EU durchgeführt werden. Die Voraussetzung hierfür ist eine ordnungsgemäße Ausfuhr, deren rechtliche Grundlagen insbesondere in § 20 Absatz 3 ElektroG aufgezählt werden.

Gemäß § 22 Absatz 4 ElektroG (in Umsetzung von Artikel 10 Absatz 2 der WEEE-Richtlinie) dürfen EAG, die aus der EU ausgeführt werden, nur dann für die Verwertungsquoten berücksichtigt werden, wenn der Exporteur beweisen kann, dass die Behandlung unter gleichwertigen Bedingungen erfolgt ist. Bezüglich der Festlegung der gleichwertigen Bedingungen wartet(e) die EU-Kommission die Finalisierung der CENELEC-Normen für die Behandlung von EAG, siehe Tabelle 2, ab. Relevant für die Endbehandlung leiterplattenhaltiger Fraktionen ist die CENELEC-Norm TS 50625-5.

## Status Quo

Leiterplatten und leiterplattenhaltige Fraktionen werden von Erst- oder Folgebehandlern separiert. Die Fraktionen werden zur Verwertung metallurgischen Prozessen der Rückgewinnung von Kupfer, Edelmetallen und weiteren Metallen zugeführt. Daneben werden auch einige besonders edelmetallhaltige Altgeräte, z. B. Mobiltelefone, nach der Schadstoffentfrachtung (Batterieentnahme) direkt zur Verwertung metallurgischen Prozessen zugeführt. In der Regel handelt es sich um Kupferhütten. Sie müssen in Europa die Anforderungen der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie erfüllen. Sie erreichen hohe Rückgewinnungsraten für Kupfer und Edelmetalle. Für Kupfer und Palladium geben Reuter et al. unter Tabelle 17 zwischen 94 % und 99 % an [31]. Die integrierten Hütten von Aurubis und Umicore beispielsweise gewinnen außerdem Antimon, Zinn und Blei zurück [10].

Nach vorliegenden Kenntnissen werden Leiterplattenfraktionen nicht in Scheideanstalten, in denen keine Antimonrückgewinnung stattfindet, einer Edelmetall-Rückgewinnung unterzogen. Die Scheideanstalten können teilweise als Zwischenhändler/ Mengenkonsolidierer dienen.

Neben Anlagen zur Endbehandlung von Leiterplattenfraktionen, die hohe Rückgewinnungsraten und eine breite Palette der zurückgewonnen Metalle erreichen und gleichzeitig den europäischen Stand der Technik realisieren, kann es nach Aussage von Branchenkennern vorkommen, dass Leiterplattenfraktionen in andere (außereuropäische) Pfade gegeben, bei denen der Umfang der Rückgewinnung der Metalle bzw. die Rückgewinnungseffizienz unklar bleibt sowie eine Emissionsminderung nach dem Stand der Technik nicht sichergestellt ist.

## **Mengenpotenzial**

Die Gesamtmenge der leiterplattenhaltigen Fraktionen und edelmetallhaltigen Altgerätefraktionen, die von Erst- und Folgebehandlern zur Rückgewinnung abgegeben werden, ist nicht bekannt. Die Untergrenze bildet die Leiterplattenmenge von 1.400 t, die die Zerlegeeinrichtungen für Elektro- und Elektronikaltgeräte laut Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2015 unter der Abfallschlüssel-Unternummer 16021502\* abgaben [32].

Es ist davon auszugehen, dass ein relevanter Anteil der in Deutschland anfallenden Leiterplattenfraktionen in Rückgewinnungsanlagen in Deutschland und der EU gelangt. Das Mengenpotenzial, das durch die Behandlungsanforderung angesprochen wird, umfasst diejenigen Leiterplattenfraktionen, die derzeit im (nichteuropäischen) Ausland in Rückgewinnungsanlagen, die nicht dem Stand der Technik entsprechen, verwertet werden. Mengeninformationen liegen hierzu nicht vor.

## **Ökologische Aspekte/Motivation**

Eine Verwertung von leiterplattenhaltigen Fraktionen nach dem Stand der Technik aus Ressourcen- und Schadstoffsicht ist unter anderem folgendermaßen charakterisiert:

- ▶ Hohe Rückgewinnungsraten für die in Leiterplatten enthaltenen Metalle:
  - Mindestens 90 % für Kupfer, Gold, Silber, Palladium (entsprechend CENELEC TS 50625-5),
  - Rückgewinnung von Blei, Zinn, Antimon.
- ▶ Emissionsminderung sowie Umwelt- und Energiemanagement nach dem europäischen Stand der Technik, insbesondere für die leiterplattenrelevanten Emissionsparameter Dioxine/Furane und Staub.

Siehe detaillierte Ausführungen im Abschnitt „Spezifische Begründungen“.

„Graue“ Entsorgungspfade für leiterplattenhaltige Fraktionen erreichen die beschriebenen hohen Rückgewinnungsraten und Emissionsminderungsniveaus nicht. Somit ist hier mit Verlusten an ressourcenrelevanten Rohstoffen mit einem hohen bis sehr hohen GWP-Potenzial sowie erhöhten toxischen Emissionen, u. a. durch Dioxine/Furane und schadstoffbelasteten Staub zu rechnen.

Auch die LAGA-Mitteilung M 31 B [7] weist darauf hin, dass „Leiterplatten und Leiterplattenbruch ... an sich aber nicht als toxisch zu bezeichnen [sind], erst durch ungeeignete Verwertungsverfahren können daraus kritische Substanzen freigesetzt werden“ (2.7.2.3).

## **Ökonomische Aspekte**

Durch die Abgabe an die spezifizierten Anlagen entsteht kein zusätzlicher Aufwand für die Behandler. In welchem Maße sich hierdurch Veränderungen bei den Erlösen ergeben, ist nicht bekannt.

## **Weiterer Regelungsbedarf**

Die Schaffung einer Rechtsgrundlage für die Zurverfügungstellung der Rückgewinnungsgrade aus der Kupferhütte für den Erstbehandler wird empfohlen (vgl. § 22 Abs. 3 S. 2 ElektroG).

## CENELEC

Die CENELEC TS 50625-5 (Vornorm) vom Oktober 2017 „Anforderungen an die Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (WEEE) – Teil 5: Spezifikation für die Endbehandlung der Fraktionen von Elektro- und Elektronik-Altgeräten – Kupfer und Edelmetalle“ umfasst die von Behandlungsanforderung 5 betroffenen Rückgewinnungsprozesse aus edelmetallhaltigen Leiterplattenfraktionen. Die Norm enthält umfangreiche Anforderungen an die Managementprozesse und Dokumentationspflichten der Endbehandlung von kupfer- und edelmetallhaltigen Fraktionen aus Elektroaltgeräten, die technische Ausstattung, die Probenahme und Analyse. Hierzu gehört auch die Verpflichtung für den Lieferanten der Fraktion und den Endbehandler eine schriftliche Vereinbarung über die Materialannahme zu schließen. Darin sind mindestens maximale Annahmewerte für PCBs, Quecksilber und Beryllium zu vereinbaren (Nr. 4.4). Als typische zulässige Annahmewerte werden genannt: PCB < 50 ppm, Hg < 10 ppm, Be < 200 ppm.

Metallrückgewinnung: CENELEC TS 50625-5 schreibt Mindestmetallausbeuten für die metallurgischen Prozesse in Höhe von jeweils mindestens 90 % für Kupfer, Gold, Silber und Palladium vor. Die „Metallausbeute“ wird in Nr. 3.15 definiert als *„Menge an Kupfer und Edelmetallen, die als Produkt erzielt wird („Ausgang“) aus der Verarbeitung zugeführter Materialien („Eingang“), ausgewiesen in Prozent für jedes Metall“*. Eine Definition, wie die Metallausbeute oder der „Eingang“, der die 100 %-Basis der Berechnung darstellt, zu bestimmen ist, fehlt.

Entsprechend einer Anmerkung zur Definition der Metallausbeute darf nur das „funktionale“ werkstoffliche Recycling der Metalle in die Metallausbeute eingerechnet werden: *„Die entstehenden Produkte enthalten die entsprechenden Metalle entweder als reine (elementare) Metalle oder als Legierungsmetalle (absichtlich hinzugefügt, nicht als Verunreinigung) oder als definierte Metallverbindungen (z. B. Metallsalze), nicht jedoch z. B. eingebunden in Schlacke.“* Diese Anforderung wurde in die Definition zu Behandlungsanforderung 5 übernommen.

Grenzwerte: CENELEC TS 50625-5 stellt Anforderungen in Form von Grenzwerten an die Emissionen ins Abwasser, in die Luft und die Luft am Arbeitsplatz sowie an den zulässigen Lärm. Diese Grenzwerte sind teilweise weniger anspruchsvoll als die Grenzwerte nach dem europäischen oder deutschen Stand der Technik, siehe Tabelle 11. Dies betrifft die Höhe der Grenzwerte, z. B. für Arsen im Abwasser und PCDD/F in der Abluft, und auch die Vorschrift zur Mittelung. Die Grenzwerte nach der CENELEC-Norm beziehen sich auf Jahresmittelwerte, die bei gleicher Höhe grundsätzlich leichter eingehalten werden können als Tagesmittelwerte oder Mittelwerte über den Probenahmezeitraum, wie die BVT-Schlussfolgerungen sie fordern.

Da die BVT-Schlussfolgerungen keine Lärmimmissionswerte vorgeben, werden die Werte nach der CENELEC-Norm mit den Immissionsrichtwerten der TA Lärm verglichen, siehe Tabelle 11. In den CENELEC-Normen fehlen Grenzwerte für tags; die Werte für nachts (60 dB(A)) sind erheblich lauter als in Gewerbegebieten in Deutschland vorgesehen (50 dB(A)).

**Tabelle 11: Gegenüberstellung von ausgewählten Grenzwerten aus den BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie und aus der CENELEC TS 50625-5 für die Endbehandlung kupfer- und edelmetallhaltiger Fraktionen aus Elektroaltgeräten**

Parameter	Grenzwert BVT-Schlussfolgerung (bzw. deutsches Recht)	Grenzwert CENELEC TS 50625-5
Arsen im Abwasserstrom	BVT 17: ≤ 0,1 bzw. 0,2 mg/l (Tagesmittelwert) <i>Deutsches Recht:</i> <i>Abwasserverordnung, Anhang 39:</i> ≤ 0,1 mg/l	≤ 0,2 mg/l (jährlicher Durchschnittswert)
PCDD/F in der Abluft	BVT 48: ≤ 0,1 ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup> (Mittelwert über Probenahmezeitraum von mind. 6 h)	≤ 0,5 ng I-TEQ/Nm <sup>3</sup> (jährlicher Durchschnittswert)
TVOC in der Abluft	BVT 46: 3-30 mg/Nm <sup>3</sup> (Als Tagesmittelwert oder als Mittelwert über den Probenahmezeitraum)	Kein Grenzwert
SO <sub>2</sub> in der Abluft	BVT 50: 50-300 mg/Nm <sup>3</sup> (Als Tagesmittelwert oder als Mittelwert über den Probenahmezeitraum)	Kein Grenzwert. Überwachungs- und Dokumentationspflicht
Lärm	BVT 18: keine Grenzwerte. <i>Deutsches Recht: TA Lärm</i> Immissionsrichtwerte (außerhalb von Gebäuden) a) in Industriegebieten 70 dB(A) b) in Gewerbegebieten tags 65 dB(A)                      nachts 50 dB(A) c) in urbanen Gebieten tags 63 dB (A)                      nachts 45 dB (A) (sowie weitere stufenweise strenger werdende Anforderungen für weitere Gebietsarten wie Mischgebiete, Wohngebiete etc.) tags = 6-22 Uhr,                      nachts = 22-6 Uhr	Expositionsniveau des Dauerschallpegels der Anlage an der nächstgelegenen Privatwohnung: tags: keine Anforderung nachts: < 60 dB(A) über 8 h zwischen 23 und 7 Uhr

### Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Die LAGA-Mitteilung M 31 B weist im Abschnitt 2.7.2.3 auf die Gefahr hin, dass beim Verarbeitungsprozess von Leiterplatten (genau wie bei thermischen Abfallbehandlungsverfahren) bei unzureichenden Filter- oder Nachsorgetechnologien aus Leiterplatten Halogenwasserstoffe freigesetzt und unter Umständen PBDD und PBDF gebildet werden können. Aus Leiterplatten(bruch) können durch ungeeignete Verwertungsverfahren kritische Substanzen freigesetzt werden.

Dies unterstützt die Wichtigkeit einer Verwertung der Leiterplattenfraktionen nach dem immissionsbezogenen Stand der Technik sowie die Leiterplattenrelevanz des ausgewählten Parameters PCDD/F.

Die österreichische AbfallBPV regelt bezüglich der Verwertung von Leiterplatten in § 16 „Unzulässige Behandlungen“ in Absatz (5): „Eine stoffliche Verwertung der von Metallen getrennten Restfraktion der Leiterplatten ist nicht zulässig.“

Die „Allgemeinen technischen Vorschriften“ von SENS/SWICO enthalten im Abschnitt „G.5 Überwachung und Kontrolle der Qualität der Schadstoffentfrachtung“ zwar keine Rückgewinnungseffizienzen für Edelmetalle, jedoch immerhin eine Pflicht zur Kupfer-Rückgewinnung aus einer sehr kupferreichen Leichtfraktion:

„G.5.6 Beträgt der Kupfergehalt in der Leichtfraktion mehr als 4 %, muss das Kupfer in einem geeigneten Verfahren zurückgewonnen werden. Bei einem Kupferanteil zwischen 1 % und 4 % entscheidet das Kontrollorgan nach ökologischen und ökonomischen Kriterien über allfällige Maßnahmen.“

Laut Artikel 9 des Entwurfs der Schweizer Elektroaltgeräteverordnung VREG von 2013 gehört zur umweltverträglichen Entsorgung der EAG nach dem Stand der Technik namentlich auch, „verwertbare Anteile, insbesondere ... Leiterplatten ... sowie seltene technische Metalle wie Gold, Palladium, ... und Tantal, soweit möglich“ zu verwerten. Das BAFU soll dann Richtlinien über die Verfahren, die als umweltverträgliche und dem Stand der Technik entsprechenden Entsorgung gelten, erlassen.

### **Position AG und AK**

Es erfolgte grundsätzliche Zustimmung zur Anforderung. Basiswert (= 100 %) für 90 %-Ziel ist zu definieren (wurde aufgegriffen, siehe „Definitionen“ in Behandlungsempfehlung). Eine pauschale Vorgabe, die Behandlung im Nicht-EU-Ausland solle „gleichwertig mit IED“ sein, wäre nicht vollzugstauglich. Dies wurde aufgegriffen dergestalt, dass die Behandlungsempfehlung nun ausgewählte konkrete Anforderungen aus den BVT-Schlussfolgerungen mit Leiterplattenbezug (Dioxine und Staub) enthält. Die Rückgewinnungseffizienzen weisen im Gegensatz zu Anforderungen unter der IED keinen Anlagenbezug auf und sind innerhalb einer Prozesskette ggf. anlagenübergreifend zu erreichen. Dies wurde aufgegriffen.

### **Spezifische Begründungen**

#### **Ableitung der Rückgewinnungsgrade für die in Leiterplatten enthaltenen Metalle:**

- ▶ **Edelmetalle:** In Leiterplatten sind Kupfer und Edelmetalle enthalten. Möglich sind Rückgewinnungsraten von in der Regel rund 95 %, z. B. 94 bis 99 % für Gold und Palladium laut Reuter et al. in Tabelle 17 [31]. Die CENELEC TS 50625-5 gibt Rückgewinnungsgrade für Kupfer, Gold, Silber und Palladium von je 90 % vor. Es ist wahrscheinlich, dass Anlagen bzw. Prozesse, die Rückgewinnungsraten von über 90 % erreichen, häufig auch die Raten von 94 % bis 99 % erreichen. Daher wird empfohlen, den Rückgewinnungsgrad in einer Behandlungsverordnung auf 90 % (und damit konform zur Anforderung der CENELEC-Norm) festzulegen.
- ▶ **Weitere Metalle:** Des Weiteren enthalten Leiterplatten die umweltrelevanten bzw. teilweise als kritisch eingestuften Metalle Blei und Zinn (im Lot) und Antimon (als Flammschutzmittel). Integrierte Kupferhütten nach dem Stand der Technik (ggf. in Kombination mit Folgebehandlern) sind in der Lage, diese weiteren Metalle zurückzugewinnen, während es nicht sicher ist, dass Metallhütten, die nicht dem Stand der Technik entsprechen, diese Vielfalt von Metallen ebenfalls zurückzugewinnen.

- ▶ **Antimon:** Kein quantitativer Rückgewinnungsgrad: In integrierten Kupferhütten kann Antimon als Antimonsalz für die industrielle Anwendung zurückgewonnen werden. Die Rückgewinnungseffizienz wird auf 70 % geschätzt [10]. Eine direkte Zuordnung des Antimonoutput integrierter Kupferhütten zu einem möglichen Leiterplatteninput ist schwer oder kaum möglich: Der Input besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien. Das Antimon wird nicht als reiner Stoff in einem Prozess der Hütte produziert, sondern wird aus verschiedenen Prozessen (ggf. in Folgeanlagen) zusammengeführt. Daher ist eine Festlegung von quantitativen anteiligen Rückgewinnungszielen für Antimontrioxid aus Leiterplatten schwierig und die Behandlungsempfehlung beschränkt sich auf die Fähigkeit der Hütte, Antimon an sich zurückzugewinnen.
- ▶ **Anrechenbarkeit der Metalle nur bei „funktionellem Recycling“:** Die in den Leiterplattenfraktionen enthaltenen Metalle können in den Outputfraktionen der Rückgewinnungsprozesse in unterschiedlicher Weise enthalten sein. Nicht jede Erscheinungs- und Bindungsform sollte auf den Rückgewinnungsgrad anrechenbar sein. Es sollten nur Metallprodukte angerechnet werden, in denen ein funktionelles werkstoffliches Recycling der Metalle erfolgt. Auch Graedel et al. beziehen in ihre „EOL-Recyclingrate“ nur funktionelles Recycling, als elementares Metall oder Legierung, ein [33].

Das funktionelle Recycling sollte folgende Fraktionen umfassen:

- Reine (elementare) Metalle, z. B. Gold, Kupfer,
- Legierungsmetalle, die aufgrund der Materialeigenschaften erwünscht und absichtlich hinzugefügt wurden,
- Definierte Metallverbindungen wie Metallsalze oder -oxide, z. B. Antimontrioxid.

Nicht anrechenbar für die Rückgewinnungsrate sollten Metalle in folgenden Formen sein:

- Metalle in einer Legierung, die unabsichtlich (als Verunreinigung) während des Recyclingprozesses Eingang in die Legierung gefunden haben, z. B. Kupfer im Stahl
- Metalle, die als Verunreinigungen oder Kontaminationen in den Outputfraktionen enthalten sind und deren Qualität vermindern. Beispiele sind unerwünschte Legierungsbestandteile (z. B. Kupfer im Stahl) oder Kontaminationen (z. B. toxische Schwermetalle in Fraktionen für den Straßenbau). Der Ausschluss von kontaminierenden Metallen vom Rückgewinnungsgrad wird für gerechtfertigt gehalten, da es ein analoges Vorgehen unter der EG-Batterie-Richtlinie 2006/66/EG in der Kommissions-Verordnung 493/2012/EU über die Recyclingeffizienz von Altbatterien gibt. Nach Anhang II und III, jeweils Satz 2, wird „das am Ende des Recyclingverfahrens in der Outputfraktion Schlacke enthaltene Blei [bzw. Cadmium (Cd)] [...] bei der Recyclingquote des Blei [Cadmium]gehalts nicht berücksichtigt.“
- Metalle, Metalloxide, die in die Schlacke eingebunden sind, da sie in dieser Form nicht für ein funktionelles Recycling nicht mehr gewinnbar sind, z. B. Eisen- oder Aluminiumoxide in der Schlacke.

## **Emissionsminderung sowie Umwelt- und Energiemanagement nach dem Stand der Technik:**

Als Maßstab für eine Emissionsminderung in den Rückgewinnungsanlagen (Hütten) nach dem Stand der Technik dienen die europäischen Vorgaben der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie, beschrieben im Durchführungsbeschluss (EU) 2016/1032 unter der Industrieemissions-Richtlinie. Da es für die Überwachung dieser Behandlungsanforderung nicht praktikabel ist, für die Behandlung der Leiterplattenfraktionen im Nicht-EU-Ausland den Nachweis der Einhaltung aller in den BVT-Schlussfolgerungen genannten BVT einzufordern, wird der Ansatz verfolgt, ausgewählte BVT-Anforderungen, die in einem Zusammenhang speziell mit der Behandlung von Leiterplatten stehen, zu fordern:

- ▶ **Dioxine/Furane:** Leiterplatten enthalten in der Regel bromierte Flammschutzmittel, meist TBBPA. Im pyrometallurgischen Prozess können sich daraus bromierte Dioxine bilden. Einen expliziten Emissionswert für bromierte Dioxine enthalten die BVT-Schlussfolgerungen nicht. Allerdings werden chlorierte Dioxine und Furane (PCDD/F) begrenzt (BVT 48). Es ist davon auszugehen, dass Anlagen, die effizient PCDD/F mindern, gleichzeitig auch bromierte Dioxine und Furane (PBDD/F) mindern. Daher wird die Einhaltung der PCDD/F-Anforderung als leiterplattenspezifische Anforderung ausgewählt.

BVT 48 [30] nennt Maßnahmen zur Verminderung der PCDD/F-Emissionen in die Luft aus der pyrolytischen Behandlung von Kupfer-Spänen sowie aus dem Einschmelzen oder Schmelzen, der Feuerraffination (Anodenofen) und der Konvertierung in der Sekundärkupfererzeugung. Der BVT-assoziierte Emissionswert für PCDD/F-Emissionen in die Luft beträgt  $\leq 0,1 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$  - als Mittelwert über einen Probenahmezeitraum von mindestens sechs Stunden, entsprechend BVT 10 einmal pro Jahr.

- ▶ **Staub:** Leiterplatten können Schwermetalle wie Zinn und Blei enthalten. Bei den pyrometallurgischen Prozessen können sich bromierte Dioxine bilden, siehe vorigen Anstrich. Da die bromierten Dioxine sowie die Schwermetalle mit dem Staub assoziiert sind, sichert eine gute Entstaubung die Verminderung dieser gefährlichen Schadstoffemissionen. Daher wird die Einhaltung der Staub-Anforderung nach dem Stand der Technik, beschrieben in den BVT-Schlussfolgerungen 37 und 40 bis 45 [30], als weitere leiterplattenspezifische Anforderung ausgewählt.

BVT 37 und BVT 40 bis BVT 45 [30] nennen Maßnahmen zur Verminderung der Staubemissionen in die Luft aus verschiedenen Prozessen, die bei der Sekundärkupfererzeugung zum Einsatz kommen können. Die BVT-assoziierten Emissionswerte für Staubemissionen dieser Prozesse in die Luft sind in Tabelle 3 der BVT-Schlussfolgerungen zusammengestellt. Sie liegen je nach Prozess zwischen 2 und  $15 \text{ mg/Nm}^3$  - als Mittelwert über den Probenahmezeitraum (oder als alternative Option für BVT 40, 43, 44, 45 als Tagesmittelwert), entsprechend BVT 10 einmal pro Jahr bzw. bei großen Emissionsquellen kontinuierlich.

Die Anforderungen an Dioxin/Furan-Emissionen und Staub in der CENELEC TS 50625-5 sind weniger anspruchsvoll und können daher nicht zur Formulierung des Standes der Technik im Rahmen einer Behandlungsverordnung dienen. Die Grenzwerte gelten dort für die jährlichen Durchschnittswerte statt, wie in den BVT-Schlussfolgerungen, als Mittelwerte über den Probenahmezeitraum (ggf. Tagesmittelwerte). Darüber hinaus ist der PCDD/F-Grenzwert in der CENELEC-Norm mit  $0,5 \text{ ng I-TEQ/Nm}^3$  fünfmal so hoch wie der mit dem Stand der Technik in

der EU assoziierte Emissionswert von 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup> laut BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie.

**Behandlungsanforderung 6:** Abtrennung von Aluminium-Kühlkörpern aus hochwertigen, separierten Leiterplattenfraktionen vor metallurgischem Prozess der Cu-/Pb-Route, soweit die Edelmetallverluste nicht erhöht werden

**Adressat:**

EBA oder FBA (die Folgebehandlung kann auch in einer Kupferhütte erfolgen)

**Monitoring:**

Dokumentation der Prozesskette der Behandlung der hochwertigen Leiterplattenfraktionen von der Separation beim Erstbehandler über den Folgebehandler bis zum Beginn des metallurgischen Prozesses.

Ausweisen derjenigen Prozesse in dieser Kette, in denen Aluminium abgetrennt wird. Darstellung der Eignung der Prozesse zur Kühlkörperabtrennung.

Untersuchung der entsprechenden abgetrennten Aluminiumfraktion(en) auf Gold und Silber.

**Definition:**

Die Anforderung umfasst Aluminium-Kühlkörper ab 100 g.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Gering

**Bestehender Rechtsrahmen**

Das ElektroG enthält keine Regelung zu dieser Thematik.

Die Trennung von Aluminium aus den Sekundärrohstoffen vor den metallurgischen Prozessen in der Kupferhütte ist als beste verfügbare Technik in der EU definiert: BVT 20 in Abschnitt 1.2.1 der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie [30] definiert für die Kupferproduktion als BVT zur Steigerung der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus Schrott, nicht-metallische Komponenten und andere Metalle als Kupfer abzutrennen. Hierzu ist eine oder eine Kombination von vier Techniken anzuwenden, unter anderem magnetische Trennung von Eisenmetallen und optische Trennung oder Wirbelstromtrennung von Aluminium.

**Status Quo**

Etabliert ist die manuelle Separation der Aluminiumkühlkörper (vor oder nach dem Grobaufschluss) insbesondere aus den hochwertigen, separierten Leiterplattenfraktionen. Jedoch findet sie nicht immer statt. Ebenfalls großtechnisch etabliert ist die Separation von Eisen und Aluminium nach der mechanischen Zerkleinerung der Leiterplattenfraktionen, z. B. bei Folgebehandlern [10]. Dies betreffen in der Regel die weniger hochwertigen Leiterplattenfraktionen der Klassen 2 und 3 nach Aussagen von Teilnehmern des 1. AG 1-Treffens.

**Mengenpotenzial**

Übliche Aluminium-Kühlkörper von PC-Leiterplatten haben Gewichte zwischen 10 g und 500 g (Erhebung in Sander et al. [17]). Geht man von einem durchschnittlichen Gewicht der Aluminiumkühlkörper auf einer PC-Leiterplatte von 250 g aus und einem Potenzial von Alt-PC im Jahr 2020 von 1,4 Millionen Altgeräten [17], so ergibt sich ein Aluminiumpotenzial von 350 Tonnen, von dem ein (nicht bekannter) Teil derzeit separiert und zurückgewonnen wird.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Die Separation des Aluminiums aus den Leiterplattenfraktionen vor dem metallurgischen Prozess ist sinnvoll, da es in der Kupferhütte nicht metallisch zurückgewonnen werden kann, sondern als Oxid in die Schlacke übergeht und somit für ein werkstoffliches Recycling verloren ist.

Für Separation von Eisenanteilen gilt grundsätzlich das gleiche, jedoch ist eine gewisse Eisenmenge in der Kupferhütte als Reduktionsmittel erforderlich nach Aussagen von Teilnehmern auf dem 2. AG 1-Treffen.

Geht man von einem durchschnittlichen Gewicht der Aluminiumkühlkörper auf einer PC-Leiterplatte von 250 g aus (s.o. Mengenpotenzial) und einem Potenzial von Alt-PC im Jahr 2020 von 1,4 Millionen Altgeräten [17], so weisen die durch diese Behandlungsanforderung adressierten Mengen ein inhärentes Treibhauspotenzial von knapp 3.000 t CO<sub>2</sub> eq. pro a auf [10].

Es besteht jedoch ein Zielkonflikt: Erfolgt die Separation des Aluminiums aus Leiterplattenfraktionen mechanisch, kann über die abgetrennte Aluminiumfraktion ein Austrag von Edelmetallen erfolgen. Gold, das beim Separieren der Kühlkörper in die Aluminiumfraktion gelangen würde, wäre für das werkstoffliche Recycling verloren.

Die Goldproduktion verursacht Emissionen mit einem GWP von 12.500 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg, während die Aluminiumproduktion 8,2 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg verursacht [34]. Grob geschätzt, dürfte also kein Goldverlust über 1/1.500 der Masse der separierten Aluminiumkühlkörper in Kauf genommen werden.

## Ökonomische Aspekte

Die adressierten hochwertigen Leiterplatten sind zu weit überwiegenden Teilen in den Altgeräten enthalten, die entsprechend der Empfehlung zur Behandlungsanforderung 1 separiert werden und aus denen, entsprechend der Empfehlung zur Behandlungsanforderung 2: , die Leiterplatten separiert werden.

Übliche Aluminium-Kühlkörper von PC-Leiterplatten haben Gewichte zwischen 10 g und 500 g [10].

Der Erlös pro kg gemischtem Aluminium liegt aktuell bei 0,6 €/kg [35], Stand November 2017. Sander et al. errechnet für eine Demontagezeit von 15 Sekunden je Kühlkörper und Arbeitskosten von 35 €/h einen Break-even-Point bei einem Gewicht der Kühlkörper von 240 g, ab dem die Demontage wirtschaftlich realisierbar ist. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von 5 Sekunden Handlingzeit je Aluminiumkühlkörper ergibt sich ein Break-even-Point bei einem Gewicht der Kühlkörper von 320 g. Wird in dieser Rechnung ein erhöhter Erlös für die Leiterplatte ohne Kühlkörper im Vergleich zur Leiterplatte mit Kühlkörper einbezogen, so ergibt sich ein Break-even-Point bei 130 g pro Leiterplatte (nur Kosten für Demontagezeit) bzw. 180 g pro Leiterplatte (Kosten für Demontage und Handling) [10].

Der Aufwand bei der manuellen Separation wird folglich als gering eingeschätzt, sofern nur größere Kühlkörper entfernt werden, und als mittel bis hoch bei kleineren Größen. Ggf. ergeben sich Transaktionskosten für die Umstellung der Prozesse [10].

Im Status Quo erfolgt die Kühlkörper-Separation aus hochwertigen Leiterplatten bereits teilweise.

## **Weiterer Regelungsbedarf**

Fortschreibung der Definition/Abgrenzung der geregelten Kühlkörper der Behandlungsanforderung 6.

Die Separationspflicht sollte ab einer Mindestmasse von 100 g pro Kühlkörper gelten. Im Falle einer Fortschreibung der Behandlungsanforderungen in der Zukunft sollte geprüft werden, ob diese Grenze zur Anpassung an den technischen Fortschritt angepasst und ob weitere Aluminium-Bauteile, wie z. B. Smartphone-Gehäuse, in die Anforderung aufgenommen werden sollten.

Mobiltelefone/Smartphones, die teilweise Aluminiumgehäuse besitzen, werden üblicherweise nicht zerlegt und direkt in die Metallurgie gegeben. Bei Tablets, Notebooks und Laptops ist eine Separation der Kühlkörper derzeit oftmals schwierig, da keine separationsfreundliche Konstruktion vorliegt. Teilweise sind die Kühlkörper gleichzeitig Teile des Gehäuses.

## **CENELEC**

Die CENELEC-Normen schreiben diesbezüglich keine Angaben vor.

## **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

LAGA Mitteilung M 31 B [7]: In Kap. 2.7.2.3 wird darauf hingewiesen, dass die manuell und mechanisch erzeugten Leiterplattenfraktionen einer Rückgewinnung des Kupfers und der Edelmetalle zugeführt werden. Teilweise werden mit den Leiterplatten verbundene Eisen- und Aluminiumbauteile vor dem metallurgischen Verwertungsprozess mechanisch abgetrennt.

## **Position AG und AK**

Die Anregungen der Teilnehmer des 2. Treffens der AG 1 Leiterplatten am 19.05.2017 und der 3. AK-Sitzung am 13.06.2017 wurden aufgegriffen:

- Beschränkung der Anforderung auf die Aluminium-, nicht die Eisenseparation.
- Aufgreifen des Zielkonflikts Aluminium- versus Goldverluste durch den Nebensatz „soweit“.
- Beschränkung auf Kühlkörper, da Separation der Aluminiumgehäuse (z. B. von Mobiltelefonen) noch nicht Stand der Technik ist.
- Aufgreifen des Wunsches nach einer Mindestkühlkörpermasse.

Der Vorschlag der AK-Sitzung, den Nebensatz („soweit...“) wegzulassen oder die Formulierung auf Aluminium im Allgemeinen (inkl. z. B. Handy-Gehäuse) zu beziehen, wurde nicht aufgegriffen, da die Separation der Aluminiumgehäuse noch nicht Stand der Technik ist.

### **4.1.4 Weitere ressourcenrelevante Bauteile**

Die Gewinnung der Seltenerd-Magnetmaterialien wie Neodym und Dysprosium ist mit hohen Umweltbelastungen verbunden. Gleichzeitig gehören sie zu den kritischen Metallen der EU, weswegen die Kommission den Mitgliedstaaten nahelegt, das Recycling von kritischen Rohstoffen zu fördern. Eine Separationsanforderung für SE-Magnete aus EAG bildet die erforderliche Ergänzung zu den erfolgten Aktivitäten zur Verfahrensentwicklung und dient als Impulsgeber zur Beschleunigung der großtechnischen Realisierung der Recyclingverfahren in Deutschland/Europa.

**Behandlungsanforderung 7:** Separation SE-haltiger Magneten mindestens aus Linearmotoren von Festplatten und aus Motoren von Pedelects als separater Stoffstrom und Zuführung zu einem Verwertungsverfahren.

Für Festplatten, die aus Gründen des Datenschutzes zerstört werden, gilt dies nur, sofern es die zeitlichen Vorgaben an die Datenvernichtung erlauben.

**Adressat:**

Erstbehandler, ggf. Folgebehandler

**Monitoring:**

Vorhandensein eines Arbeitsplatzes zur Separation. Arbeitsanweisung zur Separation.

Dokumentation der jährlich separierten SE-Magnet-Fraktion und ihres Verbleibs (zu Verwerter bzw. Zwischenlagerung).

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Festplatten: Hoch; zukünftig ggf. mittel. Pedelects: Mittel; zukünftig ggf. gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch, hinzu kommt Kritikalität

### Bestehender Rechtsrahmen

Das ElektroG beinhaltet keine spezielle Anforderung an die separate Behandlung von SE-haltigen Magneten.

#### Festplatten: Datenschutz/ Datenvernichtung:

- ▶ Datenschutzrecht: Für Festplatten ist auch das Datenschutzrecht zu beachten. Das Bundesdatenschutzgesetz verfolgt den Zweck, den Einzelnen davor zu schützen, dass er durch den Umgang mit seinen personenbezogenen Daten in seinem Persönlichkeitsrecht beeinträchtigt wird. Dies gilt für die Nutzung personenbezogener Daten durch öffentliche und nicht-öffentliche Stellen, außer für ausschließlich für persönliche Zwecke. Die personenbezogenen Daten sind zu löschen, wenn ihre Kenntnis für die Aufgabe nicht mehr erforderlich ist.

Ist eine Datenvernichtung vorgeschrieben, wird häufig DIN 66399 „Vernichten von Datenträgern“ angewendet. Laut dieser Norm ist die Vernichtung in Schutzklasse 2 (hoher Schutzbedarf für vertrauliche Daten) innerhalb von 24 Stunden nach Erhalt durchzuführen, bei Schutzklasse 3 sofort nach Erhalt. DIN 66399 schreibt zur Vernichtung stets eine Zerteilung und Verformung der Festplatte mit maximalen Teilchengrößen von 2000 mm<sup>2</sup> (Sicherheitsstufe H-4) bzw. 320 mm<sup>2</sup> (H-5) vor.

- ▶ ElektroG: Gemäß § 18 (1) Nr. 7 ElektroG haben die öRE die privaten Haushalte darüber zu informieren, dass diese selbst die Eigenverantwortung für das Löschen der Daten auf den zu entsorgenden Altgeräten tragen.

Der LAGA-ARA beschloss auf der 111. Sitzung im Februar 2017, dass die Festplattenlöschung durch die Zerstörung von Festplatten nach Datenschutzrecht eine Erstbehandlung ist, sofern die Abfalleigenschaft bereits eingetreten ist, es sich also nicht um eine zerstörungsfreie Löschung ohne Entledigungswillen handelt.

## Status Quo

**Festplatten:** Festplatten kommen in Form von externen Festplatten und als Teile von Servern, PCs und Laptops im EAG-Strom vor. Die Massen der SE-Magnete (oder auch NdFeB-Magnete) in Festplatten sowie ihre chemische Zusammensetzung (z. B. Nd, Dy, Pr, Co) variieren zwischen Herstellern und im Zeitverlauf.

Festplatten werden teilweise aus Datenschutzgründen zerkleinert, nach Schätzung eines Entsorgungsfachbetriebs [11] zu 10-20 %. Ansonsten gibt das Unternehmen an, dass Festplatten häufig aus PCs als Monostrom separiert werden [11]. Teilweise verbleiben sie im allgemeinen Altgerätestrom. In beiden Fällen werden sie zur Gewinnung von Eisen und Aluminium und ggf. Leiterplattenfraktionen geschreddert [11, 21]. Eine Separation der SE-Magnete aus Festplatten findet aktuell nicht bzw. nicht systematisch statt. Einige Erstbehandler haben SE-Magnete in unterschiedlichem Umfang separiert, beispielsweise in Kooperation mit sozialen Einrichtungen [10].

**Pedelects:** Jedes Pedelect enthält im Elektromotor einen SE-Magnet (oder auch NdFeB-Magnet). Bisher ist der Anfall von Pedelects im Elektroaltgerätestrom gering, jedoch sind sie ein zukünftig stark zunehmender Abfallstrom, siehe Mengenpotenzial. Eine Separation der SE-Magnete aus Pedelects findet bisher nicht statt [36].

**Behandlung:** Um SE-Magnete aus EAG zurückzugewinnen, muss bislang auf manuelle Demontage zurückgegriffen werden. Vor dem Recycling der Magneten erfolgt eine Entmagnetisierung, z. B. durch Erhitzen.

Werden die magnethaltigen Bauteile geschreddert, sind eine Separation und ein Magnetrecycling kaum möglich. Die Magnetbruchstücke haften an Teilen der Fe-Metallfraktion bzw. den Zerkleinerungsaggregaten an. Aufgrund der spröden Eigenschaften gelangt ein Teil ins Feinkorn.

**Innovationstrends:** Apple entwickelt in einem Forschungsprojekt eine automatische robotergestützte Zerlegung. Die 29 Demontageroboter LIAM zerlegen ausgediente Mobiltelefone des Modells iPhone 6. Die Lautsprecher als SE-Magnet-haltige Bauteile werden mit dem Ziel der Lenkung ins SE-Metallrecycling separiert [37]. Als Aufschluss technik für Festplatten könnte die in der Entwicklung befindliche elektrohydraulische Fragmentierung interessant werden, die ein Teilnehmer auf den 2. AG 1-Treffen vorstellte.

**Magnetrecycling:** In Deutschland und in der EU existiert noch kein großtechnisches Recyclingverfahren für Permanentmagnetwerkstoffe. Mehrere Verfahren sind, zum Teil mit Bundesmitteln gefördert, in der Entwicklung, siehe unten „Ökonomische Aspekte“. Die verfolgten Verfahrensansätze reichen von der Wiederverwendung über das werkstoffliche Recycling des Magnetmaterials bis zum rohstofflichen Recycling mit Gewinnung von Seltenerd oxiden.

## Mengenpotenzial

SE-Magneten oder auch Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten) enthalten rund 28-35 % Seltene Erden (Nd, Pr, Dy, Tb) [38], überwiegend Neodym. Die Mengenabschätzung zu NdFeB-Magneten (Tabelle 12) zeigt ein hohes Abfallpotenzial in Deutschland im Jahr 2020 für IT-Geräte, insbesondere Festplatten, sowie eine stark steigende Tendenz für Elektrofahrräder.

Festplatten sind der derzeit mengenmäßig größte neodymhaltige Abfallstrom [12]. In einer Festplatte sind 1 bis rund 10 g Neodym zu erwarten [12, 38, 39], siehe Tabelle 13. Der Neodymanteil im Magnetmaterial beträgt ca. 32 % [38]. Die in Deutschland 2010 in Verkehr gebrachte Menge an Nd aus PCs, Laptops und externen Festplatten liegt bei 30-60 t, sie stammen

zum großen Teil aus den Festplatten (daneben aus optischen Laufwerken und Lautsprechern). Derzeit findet ein Technologiesprung bei Speichermedien statt. Festplatten werden durch Solid State Disks (SSD) ersetzt. Diese beinhalten keine Magnetwerkstoffe. Elwert et al. prognostiziert eine Abnahme der Ausstattung von PCs, Laptops und Spielkonsolen mit magnethaltigen Festplatten von 94 % im Jahr 2012 auf 0 % im Jahr 2028 [38]. Langfristig werden bis 2040 parallel andere neodymhaltige Abfallströme zunehmen, z. B. aus industriellen Elektromotoren, Pedelecs, Elektromobilität.

**Tabelle 12: Mengenpotenziale NdFeB-Magnete in Deutschland 2020 aus Elektroaltgeräten und weiteren Abfällen [17, 36, 40]**

Produkt	Abfallpotenzial 2020	Tendenz
IT (Festplatten, Kopfhörer, Lautsprecher)	77 t	↘
Elektrofahrräder	6 t	↗↗
Raumklimaanlagen	2 t	↗↗
MRTs	<1 t	=
Nabendynamos	1 t	↗
Industrielle Motoren (Maschinen)	60 t	↗
Windenergieanlagen	3 t	↗↗
PKW	2 t	↗↗

**Tabelle 13: Neodym in festplattenhaltigen Produkten**

Produkt	Neodym pro Produkt (davon in Festplatte)			Nd in i. V. g. M 2010
	Elwert et al. 2017 [38]	Westphal und Kuchta 2012 [39]	Sander et al. 2012 [12]	
PC	5,6 g	5,0 g (3,6 g)	6,8 g	11 t
Laptop	4,0 g	4,4 g (1,1 g)	2,1 g	15 t
Externe Festplatte	k.A.	k.A.	1–11,5g	3 - 36 t
Summe				29 - 62 t

**Pedelecs:** SE-Magnete aus den Pedelecs werden zukünftig eine wesentliche Einzelquelle für Sekundärneodym darstellen [36]. Im Jahr 2016 gab es in Deutschland ca. 3 Millionen E-Bikes [41]. Die Verkaufszahlen sind in den letzten Jahren sehr stark gestiegen, siehe Tabelle 15. Mit einer geschätzten Lebensdauer eines Pedelecs von 10 Jahren ist mit einem Anfall von bis zu 0,5 Mio. Altpedelecs im Jahr 2025 zu rechnen [42]. Die Antriebe bzw. Elektromotoren von E-Rädern wiegen zwischen etwa 2 und 6 kg. Sie bestehen vorwiegend aus Kupfer und Stahl.

**Tabelle 14: SE-Magneten in Pedelec-Motoren**

	Literaturwerte	Pedelec-Stichprobe	Literaturwerte
	Elwert et al. 2017 [38]	errechnet nach Zeller et al. 2016 [42], S. 63/64,124	Sander et al. 2017 [36], S. 251
SE-Magnet	325 g	40-120 g	150 g
Nd	29 % (94 g)	20-28 % (8-33 g)	20 % (30 g)
Dy	3 %	0,2-1,7 %	5 %
Pr	k.A.	bis 6,6 %	k.A.

**Tabelle 15: Verkaufszahlen für elektrische Fahrräder in Deutschland und in den Motoren enthaltenes Neodym [36, 41]**

Jahr	Verkauf elektrischer Fahrräder (Stück)	Darin enthaltenes Neodym in etwa
2002	10.000	0,3 t
2007	70.000	2,1 t
2012	380.000	11,4 t
2016	605.000	18,2 t

Die Pedelec-Motoren enthalten rund 40 bis 300 g SE-Magneten, die etwa 20-30 % Neodym sowie einige Prozent Dysprosium enthalten (Tabelle 14) [36, 38, 42], sodass mit den elektrischen Fahrrädern 2016 rund 18 t Neodym in Verkehr gebracht wurden (Tabelle 15). Das Nd-Potenzial aus Pedelecs im Abfall ermittelte ReStra zu 5,6 t im Jahr 2020 [36], während Zepf sogar auf 8 t Nd kommt mit einem Anstieg auf 16,4 t bis 2023 [43]. Laut Zeller et al. beträgt das Wertstoffpotenzial 2024 in Deutschland 32 t Magnetmaterial, d. h. rund 6-9 t Nd [42].

### Weitere SE-Magnet-haltige Produkte

Folgende Produkte enthalten ebenfalls SE-Magneten. Sie wurden jedoch nicht in die Behandlungsempfehlungen aufgenommen.

- **Lautsprecher** enthalten nach Erfahrungen und Aussagen von Erstbehandlern beim 2. AG 1-Treffen oft ferritische Magnete. Laut Elwert et al. enthalten 15 % der Lautsprecher NdFeB-Magnete [38]. Keine Separationsempfehlung, da geringer Anteil von SE-Magneten und keine Identifizierbarkeit aufgrund fehlender Kennzeichnung.
- **Nabendynamos** wiegen in der Regel zwischen 370 g und 825 g, Durchschnitt 740 g, mit einem Magnetanteil von ca. 75 g [42]. 2015 waren ca. 2,1 bis 2,4 Mio. der in Deutschland verkauften Fahrräder mit einem Nabendynamo ausgestattet, die insgesamt 178 t Magnetmaterial enthielten [42]. Somit handelt es sich hierbei durchaus um einen mengenmäßig relevanten Stoffstrom. Derzeit (noch) keine Separationsempfehlung, da eine gezielte Erfassung von Nabendynamos aus dem Abfallstrom bisher nicht erfolgt. Spätestens mit Inkrafttreten des „Open Scope“ des ElektroG am 15.08.2018 fallen

Nabendynamos in den Anwendungsbereich des ElektroG, da sie ein eigenständig zu beurteilendes Elektrogerät darstellen. Das Fahrrad selber ist kein Elektrogerät [44].

- **Mobiltelefone:** Die Vibrationsmotoren und die Lautsprecher enthalten NdFeB-Magneten. Die Angaben zum Neodymgehalt von Mobiltelefonen und Smartphones reichen von rund 50 mg [39], über 100 mg [12] bis 600 mg [38] bzw. 240 mg Seltenerdelemente [45]. In den im Jahr 2010 in Deutschland in Verkehr gebrachten Mobiltelefonen und Smartphones waren rund 2 t Neodym enthalten [12]. Keine Separationsempfehlung, da Bauteile sehr kleinteilig und somit manuelle Demontage kaum möglich, automatisierte Zerlegung nicht Stand der Technik.

### Ökologische Aspekte/Motivation

Projekte aus Deutschland (MORE 2014, siehe [46]), der Schweiz (E-RecMet, siehe [23]) und den Niederlanden [47] kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die Sekundärproduktion von Neodymoxid aus Nd-Magneten der Primärproduktion aus ökologischer Sicht vorzuziehen ist. Dabei zieht die manuelle Separation der Magneten wesentlich weniger Verluste nach sich als die Separation nach mechanischer Aufbereitung [23, 47] und weist weniger ökologische Belastungen auf, für einige Wirkungskategorien bis zu einer Größenordnung weniger [47]. Somit ist die Separation von neodymhaltigen Magneten und Zuführung zum Magnetrecycling oder zur Seltenerd-Rückgewinnung aus Umweltgründen sehr erstrebenswert.

**Versorgungssicherheit:** Seltenerdmetalle, zu denen auch die Magnetwerkstoffe wie Neodym und Dysprosium gehören, sind in der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU aus dem Jahr 2017 enthalten [16].

### Ökonomische Aspekte

**Festplatten:** Die Separation der Festplatte und ihre manuelle Zerlegung (Behandlungsanforderung 1 und Behandlungsanforderung 2: ) ist die Voraussetzung für die Gewinnung der SE-Magnete.

In einem Zerlegeversuch in Ghana an 100 3,5 Zoll-Festplatten aus Elektroaltgeräten [21] dauerte die Separation der Leiterplatte 25 Sekunden, die Komplettzerlegung mit Gewinnung der Magnetfraktion 2:44 Minuten, je inklusive 20 % Zeit für allgemeine Arbeiten. Dies stimmt gut mit einer Schätzung eines Entsorgungsfachbetriebs von 3 Minuten pro Festplattenzerlegung überein [11]. Ein Vergleich der Zerlegekosten mit den Erlösmöglichkeiten zeigt: Während die Demontage der Leiterplatte der Festplatte (Behandlungsanforderung 2: ) kostenmäßig fast gleichwertig zur Nicht-Zerlegung ist, siehe Kapitel 4.1.1 und Tabelle 16, erscheint die Komplettzerlegung mit Separation der SE-Magneten unter den aktuellen Bedingungen nicht wirtschaftlich. Nemoto et al. halten einen Durchsatz bei der Komplett-Zerlegung von 12 Festplatten pro Person und Stunde für realistisch [48], zur Rentabilität seien jedoch 100 Festplatten pro Stunde zu zerlegen.

**Tabelle 16: Kostenschätzung und mögliche Erlöse für die Zerlegung von Festplatten**

Angaben pro Festplatte	Preis/Quelle	Gewicht Komponente [21]	Komplette Festplatte ohne Zerlegung	Separation der Leiterplatte	Komplettzerlegung mit Separation u. a. der Magneten
Demontagedauer	Manhart et al. [21]		-	0:25 min.	2:44 min.
<b>Zerlegekosten</b>	<b>35 €/h</b>		-	<b>0,24 €</b>	<b>1,59 €</b>
Festplatte komplett	0,40 €/kg [49]	510 g	0,20 €		
Festplatte ohne LP	Abschlag 30 % [21] = 0,28 €/kg	474 g	-	0,13 €	
Festplattenplatine	7 €/kg [49]	36 g	-	0,25 €	0,25 €
Aluminium	1,00 €/kg	398 g	-		0,40 €
Stahl	0,18 €/kg	61 g			0,01 €
NdFeB-Magneten	5,35 €/kg [42]	14 g			0,07 €
<b>Summe Erlösmöglichkeit</b>			<b>0,20 €</b>	<b>0,38 €</b>	<b>0,73 €</b>
<b>Erlösmöglichkeit minus Zerlegekosten</b>			<b>0,20 €</b>	<b>0,14 €</b>	<b>-0,86 €</b>

Transport- und weitere Kosten nicht berücksichtigt.

Wird neben den Magneten des Linearmotors der Schwingspule auch der Ringmagnet des Spindelmotors separiert, müssen verpresste Verbindungen von Teilen gelöst werden. Der zeitliche Aufwand ist hierbei nochmals deutlich größer als beim Linearmotor [10].

**Pedelects:** Bei der manuellen Entnahme müssen verpresste Verbindungen gelöst werden. Erstbehandler schätzen die zerstörungsfreie Entfernung der Magnete aus Pedelects als wirtschaftlich sinnvoll ein beim 2. AG 1-Treffen. Es können größere Magnete als aus Festplatten gewonnen werden, was den spezifischen Aufwand verringert.

Im baden-württembergischen Projekt zu Demontagefabriken wurde die durchschnittliche optimierte Zeit (unter Einsatz automatischer Schraubwerkzeuge) für die manuelle vollständige Zerlegung der Pedelectmotoren mit 20 Minuten (Nabenantrieb) bzw. 25 Minuten (Mittelmotor) ermittelt [42], bei 40 €/h Personalkosten kostet die Zerlegung somit 13 bis 17 Euro pro Motor. Erlösmöglichkeiten bestehen für die bei der Zerlegung erzeugten Metallfraktionen, insbesondere Kupfer, Eisen und Aluminium. Für die NdFeB-Magnet-Fraktion sind Erlöse von 5,35 €/kg möglich [42]. Eine deutschlandweite Demontagefabrik für etwa 70 % der abgeschätzten „derzeitigen“ (d. h. 2015/2016) Abfallmenge von drei magnethaltigen Strömen – 140.000 E-Fahrrad-Antriebe (60 % Mittelmotoren und 40 % Nabenantriebe), 1,4 Mio. Nabendynamos und 0,7 Mio. Elektromotoren aus Industrieanwendungen bis 90 kW – könnte derzeit nicht wirtschaftlich betrieben werden. Eine wirtschaftliche Zerlegung der Pedelect-Motoren wäre danach erst möglich, wenn die manuelle Demontagezeit auf 3,2 Minuten pro Nabenantrieb und 4,0 Minuten pro Mittelmotor reduziert werden könnte oder eine robotergestützte Demontage etabliert werden könnte [42].

**Fehlende Wirtschaftlichkeit:** Aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit besteht kein Eigeninteresse der Wirtschaftsakteure an einer Gewinnung der Magnetfraktion. Daher soll die aus Gründen der Umweltentlastung und Versorgungssicherheit anzustrebende Gewinnung der SE-Magneten durch eine gesetzliche Demontagepflicht erreicht werden.

**Recycling:** Für SE-Magnetabfälle kommen unterschiedliche Kreislaufführungen in Frage: Von einer direkten Wiederverwendung über die werkstoffliche Verwertung des Magnetmaterials bis zur rohstofflichen Verwertung über die Gewinnung von Seltenerdoxiden. Die jeweilige Wahl der Verfahrenstyps in der Praxis werde vom Verschmutzungsgrad der Magneten und der Marktnachfrage abhängen [46].

In den vergangenen Jahren wurde eine Zahl von Projekten zur Entwicklung von Recyclingverfahren für SE-Magnete von der Bundesregierung gefördert, beispielsweise MORE [46], SEMAREC [50], MagnetoRec [51], RECVAl-HPM [52] sowie auf EU-Ebene beispielsweise REMANENCE [53], ReProMag [54] und EREAN [55]. Dass in den letzten und nächsten Jahren auf deutscher und EU-Ebene insgesamt mehr als 36 Millionen Euro an öffentlichen Fördergeldern für die Entwicklung von Recyclingverfahren von SE-Magneten zur Verfügung gestellt wurden, ist sicher insbesondere der hohen Bedeutung der SE-Magnete für die Versorgungssicherheit für Zukunftstechnologien wie Elektromobilität und Windenergie und ihrer Einstufung als kritische Rohstoffe der EU geschuldet [16].

Zur Generierung größerer Mengen für das Recycling kann nach der Separation eine Bündelung mit SE-Magnetabfällen aus weiteren Anwendungsbereichen wie Industriemotoren oder Windenergieanlagen sinnvoll sein.

#### **Dualer Ansatz aus Anlagenentwicklung und Separationspflicht:**

Die Entwicklung von Anlagen- und Verfahrenstechnik zum SE-Magnetrecycling ist jedoch allein nicht ausreichend für die Verwirklichung des Recyclings in Europa, da eine Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen Rahmenbedingungen nicht gegeben ist. Eine hohe Effektivität lassen im Fall der SE-Magnete Handlungsansätze mit dualen Vorgehensweisen erwarten, in denen über verfahrensbezogene Ansätze eine großtechnische Verwertung gefördert wird und gleichzeitig auf der Ebene der Vorbehandlung Magnete separiert werden und somit die Verfügbarkeit der Inputmaterialien gesichert wird [36]. Daher stellt eine Separationsanforderung für SE-Magnete aus Festplatten und Pedelecs die erforderliche Ergänzung zu den erfolgten Aktivitäten zur Verfahrensentwicklung dar und dient als Impulsgeber zur Beschleunigung der großtechnischen Realisierung der Recyclingverfahren.

**Export/Zwischenlagerung:** Die Separationsanforderung für SE-Magnete sollte so früh wie möglich geschaffen werden, sowohl in Anbetracht der langfristig zurückgehenden Anwendung von SE-haltigen Festplatten als auch als Impuls für die Recyclingverfahren. Solange in Europa bzw. Deutschland noch keine großtechnische Recyclinganlage für SE-Magnete realisiert ist, kommt als Verbleibsoption der Export der separierten Magnete nach Asien in dort vorhandene Recyclingkapazitäten in Frage. Derzeit werden rund 150 t Magnetschrotte nach China und Japan exportiert [38].

Eine Alternative könnte eine mehrjährige Zwischenlagerung, wie sie derzeit im REFOPLAN-2016-Vorhaben „ILESA – Edel- und sondermetallhaltige Abfälle intelligent lenken“ untersucht wird, sein.

## Weiterer Regelungsbedarf

### Normung: Überarbeitung von DIN 66399 „Vernichten von Datenträgern“

Zulässigkeit auch von Nicht-zerstörenden Verfahren wie Degausser, soweit der Schutzbedarf der zu löschenden Daten und die Art des Datenträgers dies zulassen. Datenschutz und Seltenerdmetall-Recycling verhalten sich gegensätzlich zueinander, da nach mechanischer Zerstörung bisher großtechnisch keine Separation von Nd-Magneten mehr möglich ist. Zerstörungsfreie Alternativen der Datenvernichtung (z.B. Degausser) sind verfügbar, jedoch derzeit nicht in der DIN berücksichtigt.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen zur Behandlung von Elektroaltgeräten enthalten keine Vorgaben für die Separation oder Verwertung von SE-Magneten.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

**Kritische Rohstoffe:** Schwere und leichte Seltene Erden, darunter Neodym und Dysprosium, sind in der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU von 2017 enthalten [16]. Im Aktionsplan zum Kreislaufwirtschaftspaket [22] stellt die EU-Kommission dar, dass kritische Rohstoffe häufig in elektronischen Geräten vorkommen und dass die Herausforderung ihrer verstärkten Verwertung bewältigt werden muss. Daher „legt die Kommission den Mitgliedstaaten nahe, das Recycling von kritischen Rohstoffen zu fördern“.

**Datenschutz:** Bezüglich der Festplatten sind die Vorschriften zur Datenvernichtung nach dem Datenschutzrecht zu beachten. In der Regel wird DIN 66399 angewendet „Vernichten von Datenträgern“, siehe Abschnitt „Bestehender Rechtsrahmen“.

**LAGA M 31 B [7] (2.5.1, 2.7.2.3):** Festplatten enthalten Magnete u. a. mit dem kritischen Rohstoff Neodym. Eine wirtschaftliche Neodymrückgewinnung ist (noch) nicht möglich. Für eine stoffliche Verwertung wäre ein manueller Ausbau notwendig, aufgrund der Zerstörung der spröden Magnete ist eine Rückgewinnung nach mechanischer Behandlung nicht möglich. Festplatten enthalten darüber hinaus hochwertige Leiterplatten.

Aus Umweltgründen ist die Zuführung von Neodym-Eisen-Bor-Magneten zur Seltenerd-Rückgewinnung wünschenswert. Bisher hat sich in der Praxis noch keine Separierung etabliert. Rückgewinnungsverfahren sind jedoch in der Entwicklung.

Teilweise erfolgt eine zerstörende Datenträgerlöschung der Festplatten (nach DIN 66399) aufgrund von Datenschutzerfordernungen, bei der die Leiterplatten und Magneten zerkleinert werden. Die erzeugten Fraktionen werden einer geeigneten Aufbereitung zugeführt.

**VREG Schweiz:** Laut Artikel 9 des Entwurfs der Schweizer Elektroaltgeräteverordnung VREG von 2013 gehört zur umweltverträglichen Entsorgung der EAG nach dem Stand der Technik namentlich auch, „verwertbare Anteile, insbesondere ... seltene technische Metalle wie ... Indium, ... Neodym und Tantal, soweit möglich“ zu verwerten. Das BAFU soll dann Richtlinien über die Verfahren, die als umweltverträgliche und dem Stand der Technik entsprechenden Entsorgung gelten, erlassen.

### **Position AG und AK**

Zweites Treffen der AG 1 „Leiterplatten und ressourcenrelevante Bauteile“ vom 19.05.2017

- Grundsätzliche Zustimmung zur Separationspflicht für SE-Magneten aus Festplatten und Pedelecs.

- ▶ Entsprechend den aktuellen, teilweise umfangreichen Untersuchungen mehrerer Behandler sind in Holzlautsprechern keine (kaum) Nd-Magnete verbaut. Das UBA strich daher die Empfehlung zur SE-Magnet-Separationspflicht aus Holzlautsprechern.
- ▶ Hinweise: Daten können auch mit Softwarelösungen gelöscht werden. Als Nachteile wurden genannt: relativ lange Löschdauer, weniger Kundenvertrauen, keine Lösbarkeit beschädigter und nicht ansprechbarer Datenträger.
- ▶ Die Frage nach einer Änderung der Datenvernichtungsnorm wurde aufgeworfen.
- ▶ Einige AG-Teilnehmer haben Erfahrungen mit dem manuellen Ausbauen von Nd-Magneten aus Festplatten. Sie können bisher punktuell, ansonsten nur schwer vermarktet werden, zumal die Tonnagen gering sind. Die Wege lassen sich nach einem Verkauf nicht weiterverfolgen. Es fehlen Recyclingverfahren. Eine Entmagnetisierung ist bei ca. 400 °C möglich.

Dritte AK-Sitzung vom 12.06.2017, Diskussionsbeiträge:

- ▶ Mehrere Vorbehalte gegen eine Separationspflicht für Nd-Magnete wurden ins Feld geführt:
  - Bisher sind keine Verwertungsverfahren verfügbar.
  - Für Festplatten existieren zwar Absatzwege, jedoch fehlen diese für Nd-Magnete aus Festplatten.
  - Die Separation der Magneten aus Festplatten ist nicht wirtschaftlich.
  - Es gibt verschiedene Arten von Nd-Magneten, für jede müsse ein extra Verfahren etabliert werden.
  - Bisher ist das Mengenpotenzial bei Pedelecs noch sehr gering.
  - Der Mengenanfall an magnethaltigen Festplatten ist abnehmend. Daher sollte man sich auf zunehmende Mengenströme (z. B. Pedelecs, Windenergieanlagen) beschränken.
  - Im Gegensatz zur Schadstoffentfrachtung wird in der Magnetseparation kein Nutzen gesehen.
  - Es gibt eindeutigere Optimierungspotenziale als Nd-Magnetrückgewinnung, wie z. B. ein hochwertigeres Stahlrecycling.
- ▶ Das UBA ging auf die Argumente ein:
  - Um das hier vorliegende Henne-Ei-Problem aufzulösen, sollte man anfangen, diese Nd-haltigen Stoffströme zu bündeln, um die Etablierung von Recyclingtechnologien zu forcieren. Eine Behandlungsverordnung könnte den ersten Schritt machen, zumal ProgRes II das Recycling kritischer Rohstoffe fokussiert. Im UBA-Forschungsvorhaben ILESA werden Bündelung und Zwischenlagerung untersucht.
  - Zur Kostendeckung könnte die Herstellerverantwortung herangezogen werden.

- Festplatten stellen das derzeit bei weitem größte Mengenpotenzial dar. Sie können als Türöffner zur Etablierung des Nd-Recyclings dienen. Im Zeitverlauf werden ihre abnehmenden Mengen durch Nd-Magneten aus anderen Anwendungsbereichen schrittweise abgelöst.
- Der Nutzen der Separation und Rückgewinnung der Nd-Magnete besteht im ökologischen Vorteil und der Senkung der Kritikalität/ des Versorgungsrisikos.
- ▶ Die zerstörungsfreie Entfernung der Magnete aus Pedelecs wird als wirtschaftlich sinnvoll eingeschätzt.
- ▶ Festplatten, die aufgrund DIN 66399 (Vernichtung von Datenträgern) mechanisch behandelt werden, sind aus Anforderungen herauszunehmen, da die Magnete für eine mögliche Rückgewinnung verloren sind. Hierfür sei eine zerstörungsfreie Entnahme Voraussetzung. Dies sei durch thermisches Entmagnetisieren und mechanische Trennprozesse zu erreichen.
- ▶ Die Ökobilanzen zum Nd-Recycling sind kritisch zu betrachten. Im Fall des Neodyms werden Recycling-Verfahren, die es großtechnisch noch nicht gibt, mit einer Primärgewinnung im Ausland verglichen, über die keine verlässlichen Daten vorliegen.

### **Spezifische Begründungen**

Ausnahme für Festplatten: Es besteht eine Synergie mit Behandlungsanforderung 2: , was die Separationspflicht für Leiterplatten von Festplatten betrifft.

Eine Entnahme unbeschädigter SE-Magnete ist nur aus Festplatten möglich, die nicht aus Datenschutzgründen komplett geschreddert wurden. Technisch gesehen ist eine Magnetdemontage bei den Datenvernichtungsfirmen vor dem Schreddern möglich. Jedoch gibt es zeitliche Vorgaben für die Datenvernichtung nach DIN 66399: innerhalb von 24 Stunden bzw. sofort nach Erhalt. Daher gilt die Anforderung für Festplatten, die aus Datenschutzgründen geschreddert werden, nur, sofern es die zeitlichen Vorgaben an die Datenvernichtung erlauben.

## 4.2 AG 2 – Bildschirmgeräte

### 4.2.1 Grundsätzliche Anforderungen

**Behandlungsanforderung 8:** Kein Abkippen der BSG aus dem Container vom Beförderungsfahrzeug, sondern mindestens Abstellen des Containers und Ableiten lassen der BSG

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Überprüfung durch Vor-Ort-Kontrollen; Voraussetzung hierfür wäre, dass die Vollzugsperson genau zu dem Zeitpunkt vor Ort ist, wenn der Container angeliefert wird. Daher wäre eine Prüfung des Zustands der entladenen Bildschirmgeräte auf dem Lagerhaufen ggf. sinnvoller. Die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

#### Bestehender Rechtsrahmen

Eine Vorgabe, die das Abkippen der Geräte vom Beförderungsfahrzeug wörtlich/ausdrücklich verbietet, besteht nicht. Jedoch ist gemäß Anlage 4 Nr. 1 Satz 3 des ElektroG sicherzustellen, dass schadstoffhaltige Bauteile und Stoffe bei der Behandlung nicht zerstört werden und Schadstoffe nicht in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden. Nummer 5 der Anlage 4 konkretisiert, dass die umweltgerechte Vorbereitung zur Wiederverwendung und das umweltgerechte Recycling von Bauteilen oder ganzen Geräten nicht behindert werden darf. Grundsätzlich hat bereits die Erfassung der Bildschirmgeräte gemäß § 10 Absatz 2 so zu erfolgen, dass die spätere Vorbereitung zur Wiederverwendung, die Demontage und das Recycling nicht behindert werden.

#### Status Quo

Bildschirmgeräte werden bei der Anlieferung teilweise aus dem Container von dem LKW so abgeladen, dass Geräte zerstört werden und das Risiko von Schadstoffemissionen in der Anlage und im Umfeld der Anlage erhöht wird. In der weiteren Behandlung muss dann ggf. mit kontaminierten Fraktionen (z.B. Kunststoffen) umgegangen werden.

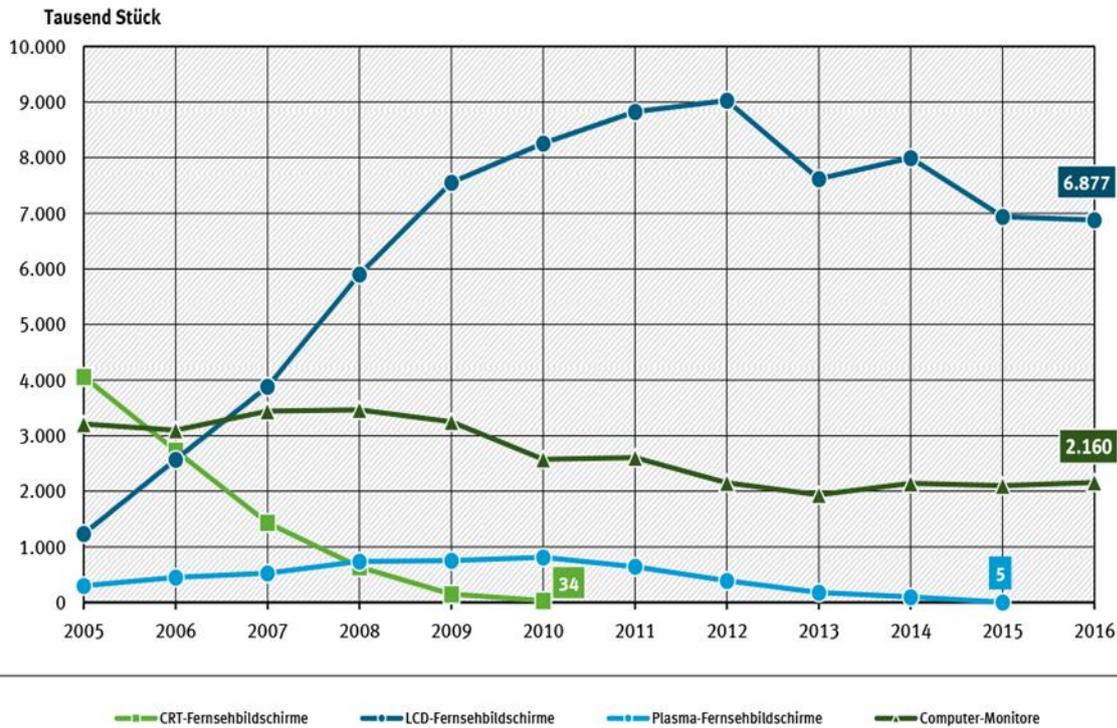
#### Mengenpotenzial

CRT-Geräte:

CRT-Geräte stellen einen abnehmenden Stoffstrom dar und werden in Deutschland nicht mehr auf den Markt gebracht. Nach Daten des Umweltbundesamts (siehe Abbildung 9) wurden 2010 noch 34.000 Stück verkauft [56].

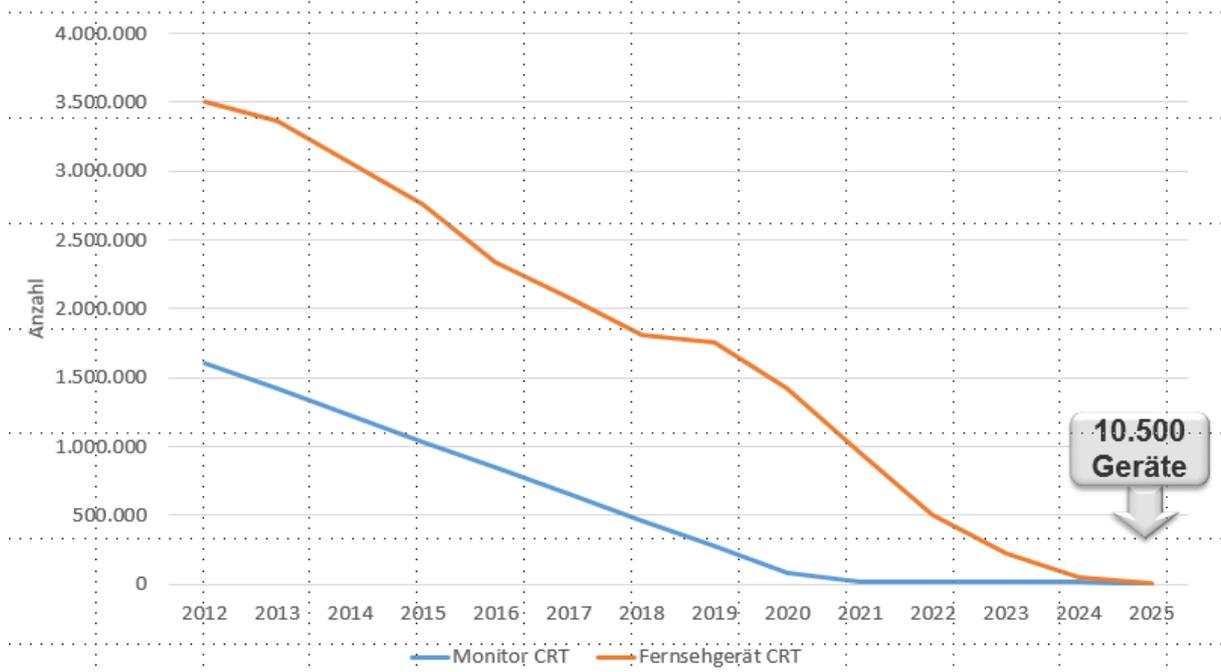
Abbildung 9: Absatz von Fernseh-Bildschirmen und Computer-Monitoren [56]

Absatz von Fernseh-Bildschirmen und Computer-Monitoren an Endverbraucher



Das Abfallpotenzial für CRT-Fernsehgeräte und -Monitore bis 2025 in Deutschland nach Auswertungen von Sander et al. (2018) [10] und Sander et al. (2012) [12] zeigt Abbildung 10. Demnach sind im Jahr 2020 noch ca. 1,3 Millionen CRT-Fernsehgeräte zu erwarten und ca. 125.000 CRT-Monitore. Im Jahr 2025 beträgt die ungefähre Gesamtzahl an CRT-Geräten zur Entsorgung noch 10.500 Stück.

Abbildung 10: Abfallpotenzial für CRT-Geräte bis 2025 in Deutschland [10]



Bei einem durchschnittlichen Gewicht von CRT-Fernsehgeräten von 26 kg und CRT-Monitoren von 15 kg ergibt sich demnach für 2020 ein durchschnittliches Abfallpotenzial für CRT-Fernseher von 33.800 t und für CRT-Monitore von 1.875 t. 2025 beträgt das berechnete durchschnittliche Gesamtgewicht für alle CRT-Geräte rund 215 t [57].

### **Flachbildschirmgeräte**

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass Flachbildschirmtechniken die klassischen Röhrenfernsehgeräte mit Kathodenstrahlröhren (CRT) abgelöst haben. In Deutschland wurden im Jahr 2016 knapp sieben Millionen Fernsehbildschirme mit Flüssigkristallanzeige (LCD) verkauft. Flachbildschirmgeräte mit Plasmaanzeige konnten sich nicht durchsetzen und wurden im Jahr 2016 in Deutschland nicht mehr abgesetzt. Allerdings steigt die Marktrelevanz von Flachbildschirmgeräten mit organischen Leuchtdiodenanzeigen (oLED) zunehmend. Die Absatzzahlen sind derzeit noch gering (55.000 Stück), zeigen aber ein deutliches Wachstum [56]. Außerdem wurden 2015 rund 2,2 Mio. LCD-Computermonitore in Deutschland verkauft.

Nach Wolf et al. hat eine aktuelle Studie zum Lebenszyklus von LCD-Geräten ein durchschnittliches Alter von 10 Jahren für LCD-CCFL-Fernseher in der Entsorgung ermittelt [9]. Das durchschnittliche Alter von LCD-CCFL-Monitoren, die in der Entsorgung anfallen, wurde in der Studie mit 8 Jahren angegeben [26]. Insgesamt wird für das Jahr 2020 ein Entsorgungsaufkommen von über 11 Millionen Stück für LCD-CCFL-Monitore und -Fernseher prognostiziert [26].

2009 waren 96,9 % bzw. 98,8 % der verkauften LCD-Fernseher bzw. -Monitore mit CCFLs ausgestattet, die Übrigen wurden mit LEDs beleuchtet. Bei Monitoren stieg der Anteil an LED-Hintergrundbeleuchtung bereits 2010 auf 44 % [58].

Für oLED-Geräte ist derzeit keine Aussage über das zukünftige Entsorgungsaufkommen möglich. Es liegen weder gesicherte Verkaufszahlen noch gesicherte Angaben zur Lebensdauer aktueller Geräte vor. Vor über 10 Jahren wurde die Lebensdauer für oLED-Anzeigen mit 10.000 Betriebsstunden beziffert [59]. Dies ist zwar eine deutlich geringere Lebensdauer als bei Plasma- und LCD-Fernsehern, durch die technologischen Entwicklungen der letzten Jahre wird sich diese jedoch erhöht haben.

Plasmafernseher haben eine Lebensdauer von 100.000 Betriebsstunden, was bei einem durchschnittlichen Gebrauch mehr als 10 Jahren entspricht [60]. Obwohl die Verkaufszahlen seit 2011 von ca. 700.000 Geräten immer weiter gesunken sind und im Jahr 2015 bei ca. 5.000 Stück lagen (vgl. Abbildung 9) [61], werden also noch einige Jahre Plasmafernseher-Mengen zur Entsorgung anfallen [9].

Eckstein et al. hat 2013 eine Abfallprognose nach zwei Szenarien für verschiedene Flachbildschirmtechnologien publiziert. Das erste Szenario beschreibt die Abfallmenge für den Durchbruch der oLED-Technologie gegenüber der LCD-Technologie. Szenario 2 zeigt die Abfallmenge für den Fall, dass die LCD-Technologie weiter den Markt beherrscht. Zu berücksichtigen ist, dass auch Flachbildschirmgeräte mit LED-Hintergrundbeleuchtung zu den LCD-Geräten zählen [62]. Die nachfolgende Tabelle 17 gibt einen Überblick zu den prognostizierten Abfallmengen für die oLED-Technologie und die LCD-Technologie für die Jahre 2020, 2025 und 2030 sowie die prognostizierte Gesamtmenge nach beiden Szenarien.

**Tabelle 17: Abfallmengenprognose Bildschirmgeräte bis 2030 nach zwei Szenarien (eigene Darstellung nach [62])**

Szenario 1: oLED-Technologie setzt sich durch				
Technologie	ungefähre Abfallmenge in t im Jahr			Gesamtabfallmenge in t für 2020 bis 2030
	2020	2025	2030	
LCD-Geräte	112.000	133.000	103.000	1.328.000
Plasma-Geräte	18.000	20.000	15.000	160.000
oLED-Geräte	1.000	10.000	34.000	144.000
Szenario 2: LCD-Technologie setzt sich durch				
Technologie	ungefähre Abfallmenge in t im Jahr			Gesamtabfallmenge in t für 2020 bis 2030
	2020	2025	2030	
LCD-Geräte	103.000	160.000	184.000	1.676.000
Plasma-Geräte	18.000	20.000	15.000	160.000
oLED-Geräte	1.000	1.000	4.000	21.000

Fröhlich (2015) geht in seinen Berechnungen von einem Abfallaufkommen für FBS-LCD-Monitoren im Jahr 2020 von 2,925 Mio. Stück aus. Bei einem durchschnittlichen Gewicht von 4,3 kg je Monitor liegt demnach das Abfallpotenzial im Jahr 2020 bei rund 12.577 Tonnen. Für FBS-LCD-Fernsehgeräte wird ein Abfallaufkommen von 8,2 Mio. Stück prognostiziert. Bei einem durchschnittlichen Gewicht von 14,5 kg je Fernseher liegt demnach das Abfallpotenzial im Jahr 2020 bei rund 118.900 Tonnen [26].

### Schadstoffmengenpotenzial

#### Cadmium

Das Leuchtpulver der Kathodenstrahlröhre eines CRT-Geräts ist mit einem Leuchtpulver beschichtet welches Cd-haltig sein kann. Vor allem bei Monochrombildröhren wurden diese Cadmiumverbindungen eingesetzt. Alte Geräte können demnach noch Cd enthalten. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Mengen dieser cadmiumhaltigen CRT-Geräte im Abfallaufkommen sehr gering sind. Zu den Mengen des Cd-Gehalts im Leuchtpulver von CRT-Geräten lagen keine Daten vor. Aufgrund der Toxizität muss trotzdem darauf geachtet werden, dass das Leuchtpulver nicht in den Recyclingkreislauf des Glases eingeschleust wird bzw. in die Umwelt gelangt [57].

#### Blei

Bleihaltige Komponenten eines CRT-Geräts sind das Konusglas, das Frittenglas und das Röhrenhalsglas der Kathodenstrahlröhre. Der PbO-Gehalt des Konusglases liegt bei 20 - 24 Gew.-% der Konusglasfraktion. Frittenglas enthält ca. 80 % PbO und Röhrenhalsglas 28 - 30 % PbO. Die Erstbehandler aus AG und AK geben den durchschnittlichen Glasanteil in CRT-Geräten mit 60 - 70 % an. Das Gewicht der Kathodenstrahlröhre setzt sich aus ca. 65 % Schirmglas sowie 30 % Konusglas und 5 % Halsglas zusammen [63].

Nach BIPRO 2006 variiert der PbO-Anteil des Konusglases zwischen 13 und 25 % und ist abhängig von Alter und Herkunft des Geräts. Die Menge an Blei (als PbO) wird demnach mit 0,5 kg für eine 12" Bildröhre und mit 3 kg für eine 32" Bildröhre angegeben. Röhrenhalsglas und

Frittenglas haben im Hinblick auf die Entsorgung aufgrund des geringen Mengenanteils nur eine geringe Relevanz [57].

Zudem enthält auch das Glas der Plasma-Bildschirmgeräte 0,2 - 0,6 % Bleioxid [24]. Die Glasfraktion eines Plasmafernsehers macht 5,2 - 12,8 kg des Geräts aus. Hieraus ergibt sich eine Bleioxidmasse von durchschnittlich 10,4 - 76,8 g pro Plasmafernseher [9]. Aufgrund der fehlenden Breite der Datenbasis für Plasma-Bildschirmgeräte können diese Werte jedoch nur als Richtwerte betrachtet werden.

### **Quecksilber**

Quecksilber ist in den Gasentladungslampen (CCFL-Röhren) der Hintergrundbeleuchtung aus LCD-Flachbildschirmen enthalten. LED-Bildschirme und oLED-Bildschirme sind quecksilberfrei.

Obwohl im Jahr 2017 der Anteil an LCD-Flachbildschirmen mit LED-Hintergrundbeleuchtung deutlich größer ist, fallen im aktuellen Abfallstrom hauptsächlich Geräte mit Hg-haltiger CCFL-Hintergrundbeleuchtung an [9].

Die CCFL-Hintergrundbeleuchtung in den Flachbildschirmgeräten kann flächig, in U-förmigen Röhren oder als gerade Röhren angebracht sein. Nach verschiedenen Angaben variieren die Quecksilbergehalte der CCFL-Röhren zwischen 2,5 und 10 mg pro Röhre, wobei Werte zwischen 3 und 5 mg als üblich gelten. Monitore weisen in der Regel 1 oder 2 Röhren auf. Fernseher enthalten durchschnittlich 16 Röhren bis mehr als 50 Röhren bei großen Geräten. Die Anzahl der Röhren nimmt dabei mit der Größe des Fernsehers zu [9]. Aus den genannten Zahlen ergeben sich demnach pro Fernsehgerät Quecksilbermengen (Annahme durchschnittlich 4 mg pro CCFL-Röhre) von 64 mg bei kleinen Geräten bis mehr als 200 mg bei großen Geräten.

### **Flammschutzmittel**

Flammschutzmittel können in den Gehäusekunststoffen, Kunststoffrückwänden und Gerätefüßen aller Bildschirmgeräte vorkommen. In verschiedenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass CRT-Geräte höhere Konzentrationen aufweisen als Flachbildschirmgeräte.

Das Mengenpotenzial für Flammschutzmittel in Bildschirmgeräten ist in Ausschleusung polybromierter Flammschutzmittel in Kunststoffen zur werkstofflichen Verwertung 4.4.2 beschrieben.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

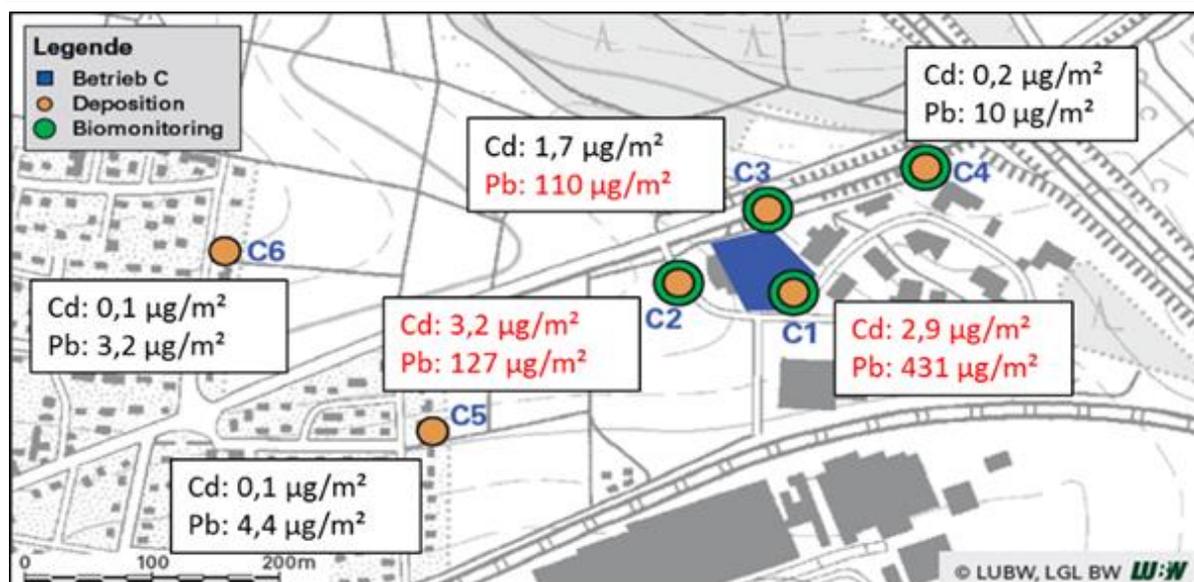
Emissionen von schadstoffhaltigen Stäuben aus CRT- und FBS-Geräten stellen eine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Die Anforderung dient der Vermeidung von Emissionen schadstoffhaltiger Stäube, einschließlich diffuser Emissionen, sowie der Vermeidung einer Verschleppung von Schadstoffbelastungen in die Umwelt und in schadstofffreie oder -arme Gerätefraktionen.

In CRT-Geräten kann cadmiumhaltiges Leuchtpulver vorkommen und die Glasfraktion ist bleihaltig. Nach CLP-Verordnung gilt Cadmium als leicht-/hochentzündlich, giftig bis sehr giftig, gesundheitsgefährdend und umweltgefährlich. Nach REACH wird es als besonders besorgniserregend eingestuft, da es krebserzeugend ist und ernsthafte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit als wahrscheinlich gelten. In hohen Dosen ist Cd gesundheitsgefährdend, wenn es in den menschlichen Körper eindringt. Im Leuchtpulver kommt Cadmium als Zink-Cadmium-Sulfid vor. Dieses wird nach CLP-Verordnung als gesundheitsschädlich bei Verschlucken, kanzerogen, mutagen, reproduktionstoxisch, organschädigend und sehr gefährlich für Wasserorganismen bewertet.

Blei wird nach CLP-Verordnung als gesundheitsgefährdend und umweltgefährlich bewertet. Toxische bleihaltige Stäube können durch Einatmen über die Lunge aufgenommen werden oder gelangen durch Verschlucken in den Körper. Solange das Bleioxid aus der Glasfraktion der CRT-Geräte in der Glasmatrix der Bildröhre eingebunden ist und die Bildröhre nicht beschädigt wird, besteht bei der Verwendung von Bildröhren keine Gefahr für den Verbraucher und die Umwelt [57].

Die Untersuchungen auf Schwermetalleinträge in der Umgebung eines Recyclingbetriebes für EAG, durchgeführt von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, ergaben eine maximale Pb-Konzentration von  $431 \mu\text{g}/\text{m}^2$  und eine maximale Cd-Konzentration von  $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^2$  [64]. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 11 dargestellt. Im Untersuchungsgebiet überschritten im Messzeitraum auf dem Betriebsgelände am Messpunkt C1 und im unmittelbaren Umfeld des Betriebes an den Messpunkten C2 und C3 die Pb-Einträge den Immissionswert der TA Luft ( $\text{Cd} = 2 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ;  $\text{Pb} = 100 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ). Auch die Cd-Einträge lagen an C1 und C2 über dem Immissionswert der TA Luft. Des Weiteren überstiegen am Messpunkt C1 die Cd- und Pb-Einträge die zulässigen, zusätzlichen, jährlichen Frachten von Cd und Pb gemäß Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung [64].

**Abbildung 11: Schadstoffeinträge in der Umgebung einer Recyclinganlage für EAG (veränderte Darstellung nach [64])**



Erhöhte Cd- und Pb-Einträge außerhalb der Recyclinganlage können ein Hinweis darauf sein, dass innerhalb der Anlage ähnlich hohe oder höhere Schadstoffkonzentrationen zu erwarten sind. Aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bestehen Arbeitsplatzgrenzwerte für Staub, Blei und bleihaltige Verbindungen in der Raumluft. Die Richtlinie 98/24/EG schreibt einen verbindlichen EU-Arbeitsplatzgrenzwert von  $0,15 \text{ mg}/\text{m}^3$  Raumluft für Blei und anorganische Bleiverbindungen vor. Die TRGS 505 schreibt einen Konzentrationswert von  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  Raumluft für Blei vor, bei dessen Überschreitung zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.

Bei der unsachgemäßen Handhabung von Flachbildschirmgeräten kann es zu Quecksilberemissionen und zur Quecksilberexposition aus der zerbrochenen Hintergrundbeleuchtung kommen. In Flachbildschirmgeräten kommt Quecksilber in den verbauten Gasentladungslampen (CCFL-Röhren) der Hintergrundbeleuchtung vor. Quecksilber wird als gesundheitsgefährlich, hochtoxisch und umweltgefährlich bewertet. Es schädigt die

Organe und beim Einatmen von Quecksilberdampf besteht Lebensgefahr. Quecksilber geht bereits bei Raumtemperatur in die Dampfphase über und ist dadurch lungengängig. Zum Schutz von Personen, die am Arbeitsplatz einer möglichen Quecksilberemission ausgesetzt sind, ist in den technischen Regeln für Gefahrstoffe ein Arbeitsplatzgrenzwert von  $0,02 \text{ mg/m}^3$  ( $20 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ ) festgelegt [9]. Quecksilber ist persistent, hoch bioakkumulativ und wird weiträumig in der Atmosphäre transportiert. Daher können Hg-Emissionen weitreichende Umweltauswirkungen haben. Zur Verhinderung bzw. Begrenzung von Quecksilberemissionen sind deshalb die zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten auszuschöpfen, wie die Nutzung bester verfügbarer Techniken und bester Umweltschutzpraktiken.

Solange die Hg-haltigen CCFL-Röhren unbeschädigt sind, kommt es zu keiner Quecksilberemission. Die Gefahr des Zerschlagens der CCFL-Röhren ist bereits vor der Anlieferung in der EBA und oder beim Entladen der Geräte in der EBA gegeben [9]. Bei größeren Fallhöhen beim Be- und Entladen können die Geräte beschädigt werden [65]. Der Zustand der FBS-CCFL-Geräte und somit der Anteil an gebrochenen Röhren wird von der Liefer- und Lagerlogistik beeinflusst. Die Anlieferung erfolgt meist in Abrollcontainern, Gitterboxen oder Big Bags. Die Art des Transportbehälters und die zugehörigen Entladevorgänge haben also Einfluss auf den Zustand der Geräte [9].

Zusätzlich wird durch ein schonendes Abgleiten des Containers die Gefahr von Querkontaminationen der Verwertungsfractionen reduziert. Das führt zu einer Erhöhung des werkstofflichen Verwertungspotenzials, da Quecksilber kontaminierte Fractionen bei Überschreitung des Grenzwertes nicht mehr werkstofflich verwertet werden können. Auch wenn die Grenzwerte unterschritten werden, kommt es zu einem diffusen Austrag von Hg, wenn eine Querkontamination erfolgt ist. Nach Wolf et al. wurden im Rahmen des Projekts Untersuchungen des IUTA gemacht, bei denen der Hg-Gehalt in beschädigten Flachbildschirmgeräten gemessen wurde. Das Ergebnis aus 5 untersuchten Geräten mit insgesamt 175 Messwerten war, dass der Hg-Gehalt in Geräten mit zerbrochenen CCFL-Röhren deutlich erhöht ist. Auch in Geräten, die keine zerbrochenen Lampen enthalten, lagert sich Hg an durch diffuse Schadstoffausträge aus CCFL-haltigen Geräten [9]. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 18 dargestellt.

**Tabelle 18: Hg-Gehalt in beschädigten Flachbildschirmgeräten nach Untersuchungen des IUTA (eigene Darstellung nach [9])**

Nummer	Zerstörte Röhren (Absolute Anzahl und prozentualer Anteil)		Durchschnittliche Hg-Konzentration	Maximale Hg-Konzentration
	Anzahl	Anteil (%)		
1	5	42 %	$7,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$	$16,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$
2	9	75 %	$10,7 \text{ }\mu\text{g/m}^3$	$36,7 \text{ }\mu\text{g/m}^3$
3	0	0 %	$2,7 \text{ }\mu\text{g/m}^3$	$3,5 \text{ }\mu\text{g/m}^3$
4	8	100 %	$23,0 \text{ }\mu\text{g/m}^3$	$95,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$
5	0	0 %	$3,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$	$4,2 \text{ }\mu\text{g/m}^3$

### Ökonomische Aspekte

Bei einer schonenderen Entladung wird der Container abgesetzt und die Bildschirmgeräte gleiten aus dem Container mit geringerer Fallhöhe ab. Bei ausreichend vorhandener Freifläche in der EBA, entsteht nur ein geringer Zusatzaufwand durch das Entladen und wieder aufladen

des Containers auf den LKW. Wenn keine entsprechende Freifläche vorhanden ist, ergibt sich die Notwendigkeit, entsprechende Einrichtungen aufzustellen, auf die die Geräte entladen werden können (z. B. Querförderbänder) mit entsprechend erhöhtem Aufwand für die Umsetzung dieser Anforderung.

### **Weitere Untersuchungen zur Freisetzung von Quecksilber**

Verschiedene Untersuchungen und Studien von mehreren Stakeholdern bezüglich der Freisetzung von Quecksilber aus Bildschirmgeräten und der möglichen Überschreitung von Emissions- und Arbeitsplatzgrenzwerten waren im Ergebnis teils sehr gegensätzlich in Bezug auf die Quecksilberfreisetzungsthematik.

Untersuchungen der Vereinigung der Elektrogeräterecycler in Europa (EERA) zur Freisetzung von Quecksilber aus Flachbildschirmen durch unsachgemäßes Einladen bzw. den unsachgemäßen Umgang haben ergeben, dass durch das Einwerfen der Geräte in den Sammelcontainer Bruch entsteht, welcher zu Quecksilberemissionen führt. Dazu wurden mit einem Kran LCD-Displays aus Fallhöhen von ca. 2,5 - 4 m Höhe in einen Stahlcontainer gekippt und die dabei auftretenden Quecksilberemissionen gemessen. Im Ergebnis der Studie wurde festgestellt, dass die Grenzwerte für maximale Arbeitsplatzgrenzwerte zu keinem Zeitpunkt überschritten wurden, die Emissionsrate jedoch stark temperaturabhängig und luftzirkulationsabhängig ist. Ungefähr 30 % der LCD-Anzeigen enthielten eine oder mehrere gebrochene Lampen der Hintergrundbeleuchtung. Die im (geschlossenen) Container gemessenen Konzentrationen zeigten, dass die Konzentration von Quecksilberdämpfen in der Luft ca. 1 - 1,5 Stunden nach dem Bruch der Lampen am höchsten war. Erst nach 16 Stunden ist die Konzentration von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auf weniger als  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gesunken. Die Quecksilberemissionen können teils für Tage bis Wochen andauern [66].

Die Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis zum Thema Elektronikschrottreycling, herausgegeben vom Regierungspräsidium Kassel, beschrieb aufgrund verschiedener Untersuchungen, dass Expositionen von Quecksilber am Arbeitsplatz von Relevanz sind, wenn diese Bauteile beschädigt sind bzw. bei der Demontage beschädigt werden und Quecksilber austreten kann. Im Prinzip kann jede zerbrochene quecksilberhaltige Lampe aus einem LCD-Bildschirm zu einer Arbeitsplatzbelastung führen, die über dem Arbeitsplatzgrenzwert liegt. Aus der Auswertung verschiedenster erhobener Daten geht hervor, dass von den auftretenden Gefahrstoffen in der Luft am Arbeitsplatz insbesondere Staub, Cadmium und Blei einen relevanten Beitrag zur Exposition leisten können. Quecksilber ist dann bedeutsam, wenn defekte quecksilberhaltige Bauteile am Arbeitsplatz vorkommen. Wenn sichergestellt wird, dass eine zerstörungsfreie Anlieferung der Geräte erfolgt und schadstoffhaltige Bauteile sachgerecht ausgebaut werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Beurteilungsmaßstäbe für diese Schadstoffe eingehalten werden [67].

Untersuchungen der Unfallversicherungsträger erstreckten sich auf die Quecksilberexposition bei Herstellung, Sammlung, Behandlung und Recycling von Leuchtmitteln und Geräten mit quecksilberhaltigen Lampen als Hintergrundbeleuchtung. Daran beteiligt waren das Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA), die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BauA) sowie die Landesstelle für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW (LUBW). Die Ergebnisse zeigten, dass die Quecksilberexpositionen sowohl bei der Sammlung, Annahme und Lagerung von Leuchtmitteln, als auch bei der Demontage von quecksilberhaltigen Flachbildschirmen (auch unter worst-case Szenarien) unter den Arbeitsplatzgrenzwert für Quecksilber von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegen. Die ermittelten Emissionen kamen außerdem zu dem Schluss, dass der Arbeitsplatzgrenzwert beim Zerschlagen weniger quecksilberhaltiger CCFL-Lampen pro Schicht in einem Arbeitsraum auch ohne technische Lüftung unterschritten wird [68].

Festzuhalten ist, dass durch unsachgemäßen Umgang mit Bildschirmgeräten sowohl beim Einladen der Geräte in den Container, beim Abladen der Geräte und bei der Behandlung der Geräte eine erhöhte Bruchgefahr und Schadstofffreisetzungsfahr besteht und/oder Quecksilberemissionen gegenwärtig sind. Quecksilber lagert sich in den Geräten an und wird akkumuliert. Es kann dadurch unkontrolliert in die Umwelt gelangen und in schadstofffreie Ströme verschleppt werden. In der Folge kann potenziell die hochwertige stoffliche Verwertung aller Fraktionen beeinträchtigt werden.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-1 verbietet in Abschnitt 5.3 u. a. das unkontrollierte Ab- oder Auskippen von Behältern mit CRT-Geräten, Geräten mit Flachbildschirmmodulen. Jegliche Behandlung von EAG einschließlich des Auf- und Abladens muss so geschehen, dass Beschädigungen von EAG vermieden werden, bei denen die Gefahr eines Austritts von Schadstoffen besteht.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Im 2. Abschnitt § 4 Absatz 2 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung ist festgeschrieben, dass bei der Lagerung und dem Transport von EAG, Beschädigungen die ein Entweichen von gefährlichen Stoffen mit sich ziehen können, zu vermeiden sind. Die Lagerung und der Transport haben so zu erfolgen, dass eine nachfolgende Zerlegung oder ein Recycling nicht erschwert wird. Absatz 7 regelt unter anderem, dass Bildschirmgeräte ausreichend gegen Bruch gesichert zu transportieren sind und verbietet die Sammlung und Lagerung in Form einer losen Schüttung.

Teil I Abschnitt D.6.1 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling schreibt die Verhinderung von Hg-Emissionen auf geeignete Weise vor. Abschnitt F.2.1 regelt die Handhabung von Behältnissen mit gemischten Gütern in der Art und Weise, dass keine Bildschirme beschädigt werden.

### **Position AG und AK**

Der Anforderung wurde in der AG und im AK zugestimmt. Die AG sprach sich im 2. Treffen für ein Abgleiten der Geräte aus dem abgesetzten Container aus. Zwei Akteure berichteten von einem Abgleiten der Geräte auf ein Quer-Förderband in ihrer Anlage.

### **Behandlungsanforderung 9: Witterungsgeschützte Lagerung von CRT-/FBS-Geräten und deren schadstoffhaltigen Fraktionen**

#### **Adressat:**

EBA

#### **Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

#### **Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Hoch

#### **Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### **Bestehender Rechtsrahmen**

Gemäß § 20 Absatz 2 Satz 4 ElektroG müssen Standorte für die Lagerung und Behandlung von Altgeräten mindestens die technischen Anforderungen nach Anlage 5 erfüllen. Anlage 5 Nr. 1b regelt, dass Standorte für die Lagerung (einschließlich der Zwischenlagerung) von Altgeräten vor ihrer Behandlung geeignete Bereiche mit wetterbeständiger Abdeckung haben müssen.

Nummer 2b konkretisiert, dass Standorte und Einrichtungen für die Behandlung von Altgeräten geeignete Bereiche mit undurchlässiger Oberfläche und wasserundurchlässiger Abdeckung haben müssen. Zudem regelt Anlage 2c einen geeigneten Lagerraum für demontierte Einzelteile und 2d geeignete Behälter für die Lagerung von gefährlichen Abfällen.

### **Status Quo**

Eine witterungsgeschützte Lagerung von Bildschirmgeräten und schadstoffhaltigen Fraktionen ist nicht immer gegeben.

### **Mengenpotenzial**

Das Mengenpotenzial für Bildschirmgeräte ist unter Behandlungsanforderung 8 im Abschnitt Mengenpotenzial beschrieben.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Die Behandlungsanforderung dient der Vermeidung von unkontrollierten Schadstoffemissionen und deren potenziellen Eintrag in die Umwelt. Durch eine Lagerung von CRT-/FBS-Geräten und deren schadstoffhaltigen Fraktionen, die nicht witterungsgeschützt sind, kann es zu Emissionen von Schadstoffen durch Auswaschungsprozesse (z. B. Cd-haltiges Leuchtpulver, Pb-haltiger Glasstaub) oder Ausdampfungsprozesse (Hg aus der Hintergrundbeleuchtung von LCD-CCFL-Flachbildschirmen) kommen. Besonders bei beschädigten Geräten ist die Gefahr einer Schadstofffreisetzung hoch. Bei Fraktionen, die aufgrund ihrer Schadstoffgehalte als gefährlicher Abfall einzustufen sind, ist eine witterungsgeschützte Lagerung in jedem Fall verpflichtend.

Zudem gelten die gleichen ökologischen Aspekte aus Behandlungsanforderung 8 im Hinblick auf die Gefährlichkeit, die Emissionsgefahr und die Gefahr der Exposition aus der in Bildschirmgeräten enthaltenen Schadstoffe.

### **Ökonomische Aspekte**

Eine witterungsgeschützte Lagerung kann z. B. in abgedeckten Behältern oder Hallen erfolgen. Der Aufwand ist als gering einzuschätzen. Handelt es sich bei den Fraktionen aus Bildschirmgeräten um gefährliche Abfälle, sollte kein Zusatzaufwand entstehen, da die Lagerung dieser bereits im ElektroG geregelt ist. Eine witterungsgeschützte Lagerung/ wetterbeständige Abdeckung kann auch durch ein Dach und einen seitlichen Windschutz realisiert werden bzw. sein. Der Bau einer entsprechenden Abdeckung (Dach) wird als aufwendig eingeschätzt. Eine Datengrundlage, in der die Anzahl von EBA ausgewiesen werden, die diese Anforderung bereits erfüllen und welche nicht, liegt nicht vor.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-1 schreibt in Abschnitt 4.2 eine wetterbeständige Abdeckung für Bereiche vor, in denen EAG sowie deren Fraktionen, die einen Schadstoffausstoß verursachen können, der gefährlich für die Umwelt ist, gelagert und/oder behandelt werden. Während Anlage 5 des ElektroG nur technische Anforderungen an Standorte für die Lagerung und Behandlung von Altgeräten vorschreibt werden in der CENELEC-Norm auch technische Anforderungen an Fraktionen aus EAG beschrieben.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Der 2. Abschnitt § 4 Absatz 6 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung regelt die Lagerung gebrochener Flachbildschirme und Hg-haltiger Fraktionen aus der Behandlung von Flachbildschirmen in durchstichfesten, dicht verschlossenen Gebinden zur Verhinderung von Quecksilber- und Staubemissionen. Ebenfalls ist ein Schutz vor Sonneneinstrahlung zu gewährleisten.

Teil I Abschnitt F.1.5 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling regelt, dass intakte Geräte, Bestandteile derer sowie Fraktionen aus der mechanischen Bearbeitung, bei denen durch Witterungseinflüsse Schadstoffe in die Umwelt gelangen können, grundsätzlich witterungsgeschützt zu lagern sind. Ausnahmen sind jedoch zulässig. Zudem dürfen nach Abschnitt F.1.7 Bildröhren und Flachbildschirme sowie deren Bestandteile und quecksilberhaltige Fraktionen nicht im Freien gelagert werden.

### Position AG und AK

Der Behandlungsanforderung wurde in der AG und im AK zugestimmt.

**Behandlungsanforderung 10:** Erfassung des Staubes und des freiwerdenden Quecksilbers am Entstehungspunkt bei Prozessen mit Staubentwicklung und/oder Schadstofffreisetzungsgefahr bei Bildschirmgeräten

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; Eine Prüfung im Rahmen der Zertifizierung der EBA gemäß § 21 ElektroG wird empfohlen. Die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Eine konkrete Vorgabe zur Erfassung des Staubes und des freiwerdenden Quecksilbers besteht seitens des ElektroG nicht. Die TRGS 900 beschreibt einen AGW von 1,25 mg/m<sup>3</sup> Raumluft für Staub und einen AGW für Quecksilber von 0,02 mg/m<sup>3</sup> Raumluft. Die Richtlinie 98/24/EG schreibt einen verbindlichen EU-Arbeitsplatzgrenzwert von max. 0,15 mg/m<sup>3</sup> Raumluft für Blei und anorganische Bleiverbindungen vor. Die TRGS 505 schreibt einen Konzentrationswert von 0,1 mg/m<sup>3</sup> Raumluft für Blei vor, bei dessen Überschreitung zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.

### Status Quo

Eine Erfassung des Staubes bzw. des Quecksilbers erfolgt gegebenenfalls nicht direkt am Entstehungspunkt, sondern als Teil der Abluftabsaugung an mehreren Punkten in der Anlage.

### Mengenpotenzial

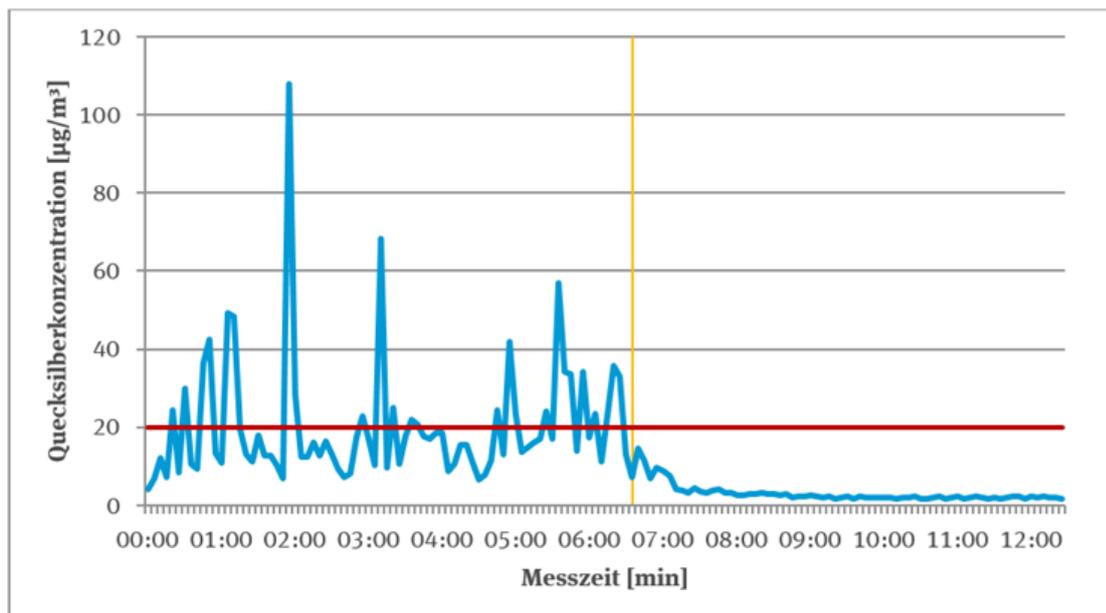
Das in Bildschirmgeräten enthaltene Schadstoffmengenpotenzial ist im Abschnitt Schadstoffmengenpotenzial der Behandlungsanforderung 8 beschrieben.

Zu den freigesetzten Mengen an cadmiumhaltigen Leuchtpulverstäuben sowie Glasstäuben (bleifrei und bleihaltig) liegen keine Daten vor.

Nach den Diskussionen in der AG und im AK sowie der Besichtigung von Anlagen zur Bildschirmaufbereitung und nach dem Gutachten von Wolf et al. ist festzustellen, dass bei den derzeit etablierten Behandlungsverfahren für Flachbildschirmgeräte die Hg-haltige Hintergrundbeleuchtung teilweise zerstörend demontiert wird. Nach Wolf et al. schwanken die Bruchraten der CCFL-Röhren zwischen 11 und 50 %, je nachdem wie erfahren das Personal ist. Eine Untersuchung der während der Demontage zerstörten CCFL-Röhren aus LCD-Fernsehern

ergab eine durchschnittliche Hg-Konzentration von  $20,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mit Maximalwerten von  $107,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die CCFL-Bruchrate bei Fernsehgeräten ist mehr als dreimal so hoch einzuschätzen wie bei Monitoren. Die Hg-Emissionen bei der zerstörenden Entnahme – ohne stattfindende Luftabsaugung – von CCFL aus einem Fernsehgerät zeigen, dass während der ersten 6 min die Hg-Konzentrationen sehr oft oberhalb des Arbeitsplatzgrenzwerts und teilweise sogar deutlich darüber lagen (siehe Abbildung 12) [9].

**Abbildung 12: Messung der emittierenden Hg-Konzentrationen aus einem LCD-Fernseher mit zerstörter Hintergrundbeleuchtung [9]**



### Ökologische Aspekte/Motivation

Es gelten die gleichen ökologischen Aspekte aus Behandlungsanforderung 8 im Hinblick auf die Gefährlichkeit, die Emissionsgefahr und die Expositionsgefahr der in Bildschirmgeräten enthaltenen Schadstoffe.

Zudem dient die Anforderung zum Schutz von Personen, die am Arbeitsplatz möglichen Schadstoffemissionen ausgesetzt sind.

Bei der mechanischen Zerkleinerung der Kathodenstrahlröhre von CRT-Geräten können bleihaltiger Glasstaub und cadmiumhaltige Leuchtpulverstäube freigesetzt werden. Bei der Handhabung von LCD-CCFL-Fernsehern und -Monitoren kann es zu Quecksilberemissionen aus zerbrochener Hintergrundbeleuchtung kommen. Aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bestehen Arbeitsplatzgrenzwerte für Staub, Blei und bleihaltige Verbindungen und Quecksilber in der Raumluft (siehe bestehender Rechtsrahmen). Eine Gesundheitsgefährdung geht von den CRT-Geräten bzw. LCD-Geräten dann aus, wenn zerkleinerte Partikel der Kathodenstrahlröhre bzw. Hg-haltige CCFL-Stäube verschluckt oder Staubpartikel aus den zerkleinerten Geräten eingeatmet werden.

Durch eine Staub- und Hg-Dampf-Erfassung am Entstehungspunkt können diffuse Emissionen im weiteren Behandlungsprozess reduziert bzw. vermieden werden. Eine verminderte Hg-Fracht in den zu verwertenden Fraktionen erhöht die Hochwertigkeit der Verwertung.

## Ökonomische Aspekte

Da die Absaugung der Luft bei der Entnahme von CCFL-Röhren nicht gesetzlich vorgeschrieben ist, ist auch eine ungeschützte Entnahme möglich. Die Behandlung von quecksilberhaltigen Bildschirmgeräten in Deutschland erfolgt größtenteils manuell oder teilautomatisch. Bei den teilautomatischen Verfahren ist eine Luftabsaugung angeschlossen. Die manuelle Demontage der CCFL-Röhren wird in einigen Behandlungsanlagen an speziell entwickelten Sicherheitsdemontagebänken in geschützter Atmosphäre unter Luftabsaugung durchgeführt. In anderen Behandlungsanlagen werden die CCFL-Röhren in ungeschützter Atmosphäre entnommen. Die Installation einer Arbeitsplatzabsaugung direkt am Entstehungspunkt erfordert hier einen hohen Aufwand. Die Kosten für einen gekapselten Arbeitsplatz inklusive Abluftreinigung bewegen sich in der Größenordnung 20.000 bis 30.000 € [10]. Für einen Absaugtisch mit Maßen für aktuelle Flachbildschirme sind ebenfalls ca. 25.000 € zu veranschlagen, durch Eigenbau können die Kosten auf unter 5.000 € vermindert werden [10]. Hinzu kommen jeweils die laufenden Kosten z. B. für Austausch und Entsorgung von Filtermedien. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass eine Arbeitsplatzabsaugung Stand der Technik und beste verfügbare Praxis ist.

## CENELEC

CENELEC EN 50625-2-2 legt in Abschnitt 5.1.1 und 5.1.2 für CRT- bzw. FBS-Geräte fest, dass während aller Behandlungsprozesse unkontrollierte Freisetzungen von fluoreszierenden und anderen Beschichtungen (Leuchtpulver), Quecksilber und Glasstaub in die Luft und Wasser zu verhindern sind, um Gesundheits- und Umweltschäden zu vermeiden. Die Behandlungsprozesse müssen unter wirksamer Staubabsaugung stattfinden, welche an ein wirksames Luftfiltersystem angeschlossen ist. Die Filter des Luftfiltersystems müssen sicherstellen, dass die national geltenden Emissionsgrenzwerte jederzeit eingehalten werden.

### Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Der 2. Abschnitt § 5 Absatz 3 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung regelt, wenn die erhöhte Gefahr einer Freisetzung von Quecksilber besteht, ist bei der Behandlung von Hg-haltigen EAG oder Bauteilen eine Arbeitsplatzabsaugung mit entsprechender Hg-Abscheidung vorzusehen. Zusätzlich regelt § 15 Absatz 1, dass bei der Behandlung von Flachbildschirmen und deren Fraktionen Staub- und Hg-emissionen zu vermeiden sind und während des Behandlungsprozesses anfallendes Hg und Stäube abzuscheiden sind.

Teil II Richtlinie II Abschnitt 1.1 und 1.3 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling besagen, dass Verfahren zur Behandlung von Flachbildschirmen einen wirksamen Rückhalt von Schadstoffen gewährleisten müssen, bzw. dass zur Einhaltung der Umwelt- und Gesundheitsschutzbestimmungen bei der manuellen Zerlegung geeignete Vorkehrungen zu treffen sind.

## Position AG und AK

Die AG und der AK stimmten der Anforderung zu. Von den Akteuren wurde die Formulierung „Erfassung des Quecksilbers, der quecksilberhaltigen Stäube und sonstigen Stäube“ vorgeschlagen.

*Hinweis: Mittlerweile (Stand: März 2020) wird der durch die Behandlungsanforderungen 11 vom UBA verfolgte Ansatz aufgrund neuer Erkenntnisse und der geänderten Rechtslage nicht weiterverfolgt.*

**Behandlungsanforderung 11:** Werkstoffliche Verwertung der Kunststoffe von Rückwänden der Bildschirmgeräte ab einem bestimmten Gesamtbromgehalt ( $\leq$  xxxx ppm)

**Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette; Folgebehandler

**Monitoring:**

Prüfung durch Kontrolle der Betriebstagebücher mit deren Massenströmen sowie Verbleib der Kunststofffraktionen und der Analyseprotokolle durch einen Sachverständigen bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel bis Hoch

**Bestehender Rechtsrahmen**

Es besteht derzeit keine konkrete Vorgabe, die eine werkstoffliche Verwertung der Kunststoffrückwände aus Bildschirmgeräten ab einem bestimmten Gesamtbromgehalt ( $\leq$  xxxx ppm) fordert. Für das Recycling von Kunststoffen aus EAG gilt jedoch der durch die POP-VO geregelte Grenzwert für bromierte Flammschutzmittel.

**Status Quo**

Es ist nicht sichergestellt, dass eine werkstoffliche Verwertung von Kunststoffrückwänden aus FBS-Geräten stattfindet. Die Separation der Kunststoffrückwände von CRT-Geräten wird in der Behandlungspraxis bereits durchgeführt.

Eine Sortentrennung der Kunststoffe im Bereich der Kunststoffgehäuse ist bereits teilweise etabliert. Die Abtrennung von Flammschutzmitteln ist Stand der Technik und bei den Folgebehandlern von Kunststofffraktionen etabliert.

In der AG und im AK wurde angemerkt, dass derzeit alle Gehäusekunststoffe aus Bildschirmgeräten als Mischkunststofffraktion zu Verwertung nach China exportiert werden.

**Mengenpotenzial**

Nach Wolf et al. beträgt der Kunststoffanteil von Flachbildschirmfernsehgeräten verschiedenen Literaturangaben nach ungefähr 30 % [9]. Flachbildschirmmonitore weisen einen Kunststoffanteil von ca. 22 – 36 % auf. Die Kunststoffrückwand eines FBS-Fernsehgeräts beträgt durchschnittlich 45 % des Gesamtkunststoffanteils [69]. Im Rahmen des SV-Gutachtens ergab eine Untersuchung aus 10 Kunststoffrückwänden von Fernsehgeräten ein durchschnittliches Gewicht von 1.775 g [9]. Laut einer Studie des Umweltbundesamts Österreich sind ca. 1,7 % der Kunststoffe aus Monitoren flammschutzmittelhaltig bzw. 8,6 % der Kunststoffe aus TV-Geräten [70]. Nach eigenen Berechnungen ergibt sich aus dem Abfallpotenzial für FBS-Fernsehgeräte bzw. FBS-Monitore im Jahr 2020 (118.900 t bzw. 12.577 t), den Kunststoffanteilen in FBS-Geräten und dem Anteil an Flammschutzmitteln in den Kunststoffen der Geräte ein flammschutzmittelfreies Kunststoffpotenzial von ca. 32.600 Tonnen für FBS-LCD-Fernsehgeräte und ca. 3.590 Tonnen für FBS-LCD-Monitore.

Der Kunststoffanteil von CRT-Fernsehern bzw. CRT-Monitoren beträgt 9,6 % bzw. 20 % [9]. Daten zum Kunststoffanteil der Gehäuserückwand bzw. Massen der Gehäuserückwände sind nicht bekannt. Damit ist das Mengenpotenzial für die CRT-Rückwände unbekannt.

Gehäusekunststoffe von CRT-Geräten können mit hoher Wahrscheinlichkeit polybromierte Flammschutzmittel enthalten [7]. Auch Wolf et al. beschreiben CRT-Geräte als überwiegend flammschutzmittelhaltig [9], somit ist das Mengenpotenzial werkstofflich verwertbarer Kunststoffe aus CRT-Geräten wahrscheinlich begrenzt. Die Datenlage ist unklar, da einerseits der Flammschutzmittelanteil in Flachbildschirmen als gering eingeschätzt wird [10]. Andererseits geben Wolf et al. an, dass in ABS-Gehäuserückwänden aus LCD-Fernsehern Antimon, Brom, Chlor und TBBPA nachgewiesen wurde [9]. Hierbei lag eine TBBPA-Konzentration von 10.000 ppm vor. Brom wurde mit einer Konzentration von 4.520 ppm Brom nachgewiesen.

Laut einer Untersuchung nach Taverna et al. aus dem Jahr 2017 zeigte eine Analyse für Kunststoffe aus Fernsehgeräten, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der Anwendung von DecaBDE, PentaBDE, OctaBDE und TBBPA, bei älteren CRT- und neueren LCD-Geräten bestehen [71]. Beispielsweise stammen je rund 20 % der DecaBDE-Einträge aus den Gehäusen dieser Geräte.

Bei HBCDD ist ein deutlicher und signifikanter Unterschied bei den Frachten aus CRT- und LCD-Bildschirmen zu erkennen. Bei Dechloran Plus zeigten sich höhere Werte bei den Gehäusen von CRT-Geräten [71].

In einer Untersuchung nach Wäger et al. aus dem Jahre 2010 konnten in Kunststoffen aus Bildschirmgeräten OctaBDE-Konzentrationen von 900 ppm in CRT-Fernsehern und bis zu 2.500 ppm in CRT-Monitoren nachgewiesen werden. In Flachbildschirmen konnte kein OctaBDE nachgewiesen werden. In Proben der Gerätekategorien 1 bis 4 wurde DecaBDE, ausgenommen Flachbildschirme, nachgewiesen. TBBPA-Gehalte von 37.000 ppm wurden in CRT-Monitoren nachgewiesen. CRT-Fernseher wiesen mit 1.000 ppm deutlich geringere Konzentrationen auf [72].

In Wolf et al. wird angegeben, dass in Untersuchungen von geschredderten CRT-Fernseher- und -Monitor-Gehäusen OctaBDE in fünf von sieben Proben gefunden wurde. Die Konzentration lag dabei zwischen 3.000 und 14.000 ppm [9].

Weitere Angaben zum Vorkommen der Flammschutzmittel in Bildschirmgeräten sind in AG 4 – Kunststoffe im 4.4.2 beim Mengenpotenzial beschrieben.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass Rückwände von CRT-Bildschirmen den Schwellenwert für den Gesamtbromgehalt regelmäßig überschreiten.

Die ökologischen Aspekte der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen sind in Kapitel 4.4.1 Ökologische Aspekte/Motivation beschrieben.

Das ökologische Gefährdungspotenzial von Flammschutzmitteln ist in Kapitel 4.4.2 Ökologische Aspekte/Motivation beschrieben.

Nach Berechnungen im begleitenden Ufoplan-Vorhaben ergibt sich aus dem Abfallpotenzial von FBS-Geräten im Jahr 2020, dem durchschnittlichen Gewicht eines FBS-Geräts, dem Kunststoffanteil der Rückwände und dem GWP der Kunststoffe aus den Rückwänden der Geräte ein inhärentes Treibhauspotenzial von knapp 140.000 t CO<sub>2</sub> eq. im Jahr 2020. Zudem ergibt sich den Berechnungen nach aus der werkstofflichen Verwertung im Vergleich zur energetischen Verwertung ein Entlastungspotenzial von knapp 70.000 t CO<sub>2</sub> eq. im Jahr 2020 [10].

## Ökonomische Aspekte

Die AG und der AK äußerten, dass im Falle eines Wegfallens des derzeit etablierten Entsorgungswegs, des Exports nach China, ein Absatzmarkt fehlt. Die Trennung der Kunststoffmischfraktion aus Bildschirmgeräten ist technisch möglich und eine Sortentrennung der Kunststoffe im Bereich der Kunststoffgehäuse bereits teilweise etabliert. Eine Trennung der dunklen und hellen BSG-Gehäuse erzeugt eine PS- (dunkel) und eine ABS- (hell) angereicherte Fraktion. Dabei enthält die PS-Fraktion deutlich weniger Flammschutzmittel als die ABS-Fraktion nach Aussage eines Teilnehmers auf dem 2. AG 2-Treffen. Die angereicherten Monofractionen werden teilweise in Deutschland verwertet. Werden Rückwände von FBS-Geräten als Teil einer gemischten Kunststofffraktion einer Kunststoffaufbereitung zugeführt, so liegen die Erlöse üblicherweise im positiven Bereich mit Schwankungen je nach Weltmarktpreisen für Sekundärkunststoffe. Nach den Aussagen der Akteure aus dem AK und der AG ist die Fraktion trotz der Möglichkeit der Kunststofftrennung wirtschaftlich nicht profitabel. Für die mit Brom-angereicherte Fraktion besteht keine Nachfrage, weshalb sie thermisch verwertet wird und kostenintensiv in die Sonderabfallverbrennung gegeben werden muss (siehe Protokoll 2. AG 2-Treffen).

## CENELEC

CENELEC EN 50625-2-2 /EN 50625-3-1/ TS 50625-3-3 beschreiben derzeit keine Anforderungen zur werkstofflichen Verwertung der Kunststoffrückwände aus Bildschirmgeräten.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Teil I Abschnitt D.3.1 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling besagt, dass Kunststofffraktionen aus der Aufbereitung von EAG stofflich verwertet werden können. Abschnitt D.3.3 fordert, dass Kunststoffe, die nicht stofflich verwertet werden können, einer energetischen Verwertung zuzuführen sind.

## Position AG und AK

Die AG äußerte, eine Anlage zur Detektion polybromierter flammenschutzmittelhaltiger und bromfreier Kunststofffraktionen einzubauen, sei wirtschaftlich unzumutbar, da es sich bei CRT-Geräten um einen auslaufenden Stoffstrom handelt. Des Weiteren messen die Geräte nur den Gesamtbromgehalt. Für CRT-Geräte wäre die ursprünglich gestellte Anforderung – Werkstoffliche Verwertung der Kunststoffe von Rückwänden der Bildschirmgeräte mit einem Gesamtbromgehalt < 1000 ppm – von den Erstbehandlern derzeit nicht einhaltbar gewesen, da die Rückwände alle belastet seien. Eine Regelung erübrige sich. Die Grenzwerte für Brom wären bei FBS-Geräten eher als bei CRT-Geräten einzuhalten. FBS-Geräte enthielten nur noch kleinere Anteile an bromierten Flammschutzmitteln. Nur ca. 8 % der Kunststoffteile sind mit polybromierten Flammschutzmitteln belastet.

Der AK merkte an, die aktuell steigenden Preise für die Verbrennung seien förderlich für das Recycling bromarmer Kunststofffraktionen.

## 4.2.2 Kathodenstrahlröhren-Geräte (CRT)

**Behandlungsanforderung 12:** Separation der Rückwände von CRT-Geräten vor mechanischen (Grob-) Zerkleinerung

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen. Die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Gemäß Anlage 4 Nr. 1 e) ElektroG müssen Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten aus EAG entfernt werden. Eine konkrete Vorgabe zur verpflichtenden Separation der Rückwände von CRT-Geräten besteht nicht.

### Status Quo

Eine manuelle Erstbehandlung von CRT-Geräten erfolgt in jedem Fall aufgrund der Anforderungen des ElektroG Anlage 4. Eine Getrennthaltung der Rückwände erfolgt nicht immer.

### Mengenpotenzial

Der Kunststoffanteil von CRT-Fernsehern bzw. CRT-Monitoren beträgt 9,6 % bzw. 20 % [9]. Daten zum Kunststoffanteil der Gehäuserückwand bzw. Massen der Gehäuserückwände sind nicht bekannt.

Bei einem durchschnittlichen Gewicht von CRT-Fernsehgeräten von 26 kg und CRT-Monitoren von 15 kg [57] ergibt sich demnach für 2020 ein durchschnittliches Abfallpotenzial für CRT-Fernseher von 33.800 t und für CRT-Monitore von 1.875 t (vgl. Mengenpotenzial CRT-Geräte Abbildung 9). Auf Grundlage dieser Berechnungen beträgt das Kunststoffabfallpotenzial 2020 für CRT-Fernsehgeräte ca. 3.245 t und 375 t für CRT-Monitore.

Das Mengenpotenzial von CRT-Geräten ist unter Behandlungsanforderung 8 bei Mengenpotenzial beschrieben. Das Mengenpotenzial für Flammschutzmittel in Rückwänden von CRT-Geräten ist unter Behandlungsanforderung 11 bei Mengenpotenzial und in AG 4 – Kunststoffe im Kapitel 4.4.2 unter Mengenpotenzial beschrieben.

### Ökologische Aspekte/Motivation

Durch die Separation der Rückwände von CRT-Geräten und deren Getrennthaltung wird eine Kontamination nicht-belasteter Fraktionen vermieden, da besonders die Rückwände von CRT-Geräten häufig nach POP-VO geregelte bromierte Flammschutzmittel enthalten.

Das ökologische Gefährdungspotenzial von polybromierten Flammschutzmitteln ist in Kapitel 4.4.2 unter Ökologische Aspekte/Motivation beschrieben.

### Ökonomische Aspekte

Da die getrennte Lagerung und der getrennte Transport den Anforderungen der POP-VO entspricht, besteht kein Zusatzaufwand im Vergleich zur Einhaltung bestehender rechtlicher

Anforderungen. Zudem besteht kein Zusatzaufwand da im Rahmen der Schadstoffentfrachtung die Rückwände von CRT-Geräten bereits separiert werden.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-2 / TS 50625-3-3 beschreiben keine Anforderungen zur Separation der Rückwände von CRT-Geräten. CENELEC TS 50625-3-1 fordert vom Betreiber einer EBA die Sicherstellung der Abtrennung der bromierten Flammschutzmittel (durch Überwachung der Folgebehandlung/-kette), wenn der Gesamtbromgehalt über 2.000 ppm liegt, angenommen wird, dass der Gesamtbromgehalt über 2.000 ppm liegt oder der Betreiber die Abtrennung selbst nicht vornimmt.<sup>5</sup>

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Gemäß Teil I Abschnitt C.2.3 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling in Verbindung mit Abschnitt D.3.1 sind Kunststoffe mit flammhemmender Wirkung aus EAG zu entfernen und entsprechend der geltenden Vorschriften zu entsorgen.

Gemäß Abschnitt 2 § 6 Absatz 1 Nr. 6 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung sind Kunststoffe die bromierte Flammschutzmittel enthalten vollständig aus EAG zu entfernen. Nach § 16 Absatz 1 ist das Zerkleinern von nicht-schadstoffentfrachteten EAG unzulässig, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine Freisetzung umweltrelevanter Stoffe in die Umwelt oder eine Verschleppung in verwertbare Fraktionen erfolgt. Zudem sind nach § 8 Absätze 1 bis 4 Kunststoffe die bromierte Flammschutzmittel enthalten selektiv zu behandeln.

### **Position AG und AK**

Die AG merkte an, dass CRT-Geräte nicht mechanisch zerkleinert werden. Die Separation der Kunststoffrückwände sei kein Problem, da diese bei der Entfrachtung bereits abgebaut werden. Der Anforderung wurde zugestimmt.

Generelle Aussage einiger Akteure war, dass in die Aufbereitung von CRT-Geräten als rückläufiger Markt mit einer Abnahme des Gerätestroms von 50 - 60 % pro Jahr und einem schnellen vorhersehbaren Auslauf nicht mehr investiert werde.

### **Behandlungsanforderung 13: Trennung von Pb-haltigem Konusglas und Pb-freiem Schirmglas aus CRT-Geräten**

#### **Adressat:**

EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette, verschiedene Akteure in der Folgebehandlung bzw. weiteren Entsorgung

#### **Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; Überprüfung der Betriebstagebücher. Die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

#### **Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Hoch

#### **Ökologischer Aspekt:**

<sup>5</sup> Es wird davon ausgegangen, dass in Rückwänden von CRT-Geräten die Konzentration von Tetrabromdiphenylether, Pentabromdiphenylether, Hexabromdiphenylether und Heptabromdiphenylether in der Summe von 1.000 mg/kg entsprechend Anhang 4 der VERORDNUNG (EG) Nr. 850/2004 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG (POP-VO) überschreitet.

Mittel bis Hoch

**Behandlungsanforderung 14:** Werkstoffliche Verwertung des Glases von mindestens 25 Gew.-% des CRT-Geräteinputs

**Adressat:**

EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette, verschiedene Akteure in der Folgebehandlung bzw. weiteren Entsorgung

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher; Überprüfung im Rahmen der Zertifizierung

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**Behandlungsanforderung 15:** Schwefelkonzentration in gereinigter Glasfraktion von CRT-Geräten: maximal 5 mg/kg

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher; Überprüfung im Rahmen der Zertifizierung

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering für CENELEC zertifizierte Anlagen

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-3

**Behandlungsanforderung 16:** PbO-Gehalt der Schirmglasfraktion: maximal 0,1 %

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher; Überprüfung im Rahmen der Zertifizierung

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**CENELEC:**

modifizierte Übernahme aus TS 50625-3-3

**Behandlungsanforderung 17:** Grenzwerte für CRT-Glas in sonstigen Fraktionen: 8 % CRT-Glas in Elektronenkanonen, 4 % CRT-Glas in Ablenkeinheit, 2 % CRT-Glas in Fraktionen aus Anti-Explosionsrahmen, Lochmasken und ggf. weiteren Bestandteilen

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher; Überprüfung im Rahmen der Zertifizierung

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering für CENELEC zertifizierte Anlagen

**Ökologischer Aspekt:**

Gering

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-3

**Behandlungsanforderung 18: Keine Verwertung des CRT-Glases als Baumaterial**

**Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette, verschiedene Akteure in der Folgebehandlung bzw. weiteren Entsorgung

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher; Überprüfung im Rahmen der Zertifizierung

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering bis Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Bestehender Rechtsrahmen**

Gemäß Anlage 4 Nr. 7 ElektroG sind Bildröhren im Rahmen der Behandlung vorrangig in Schirm- und Konusglas zu trennen. Es bestehen keine rechtlichen Vorgaben für die Behandlungsanforderungen 14 bis 18.

**Status Quo**

Die effektive Trennung von bleihaltigem Konusglas und bleifreiem Frontglas ist die Voraussetzung für das Recycling von CRT-Glas. Die Recyclingtechnik (Entfrachtung, Sortierung, Trennung) für CRT-Glas ist vorhanden und in verschiedenen Betrieben in Deutschland vorhanden. Auch LAGA M 31 B beschreibt vorhandene Verfahren [7]. Gereinigtes Schirmglas kann und wird bei einer ausreichend genauen Trennung vom Konusglas hochwertig verwertet. Im Behandlungsprozess eines auf CRT-Bildschirme spezialisierten Recyclingbetriebs werden 33 Gew.-% des Inputmaterials als trockenes entschichtetes Schirmglas als Rohstoff in der Behälterglas- und Keramikproduktion eingesetzt. Bildröhrenglas bzw. Schirmglas ist ungeeignet für den Einsatz in der Flachglasindustrie, da Blei, Barium und Strontium produktionstechnische Schwierigkeiten mit sich bringen [73].

Für eine werkstoffliche Verwertung des Glases von mindestens 25 Gew.-% des CRT-Geräteinputs muss eine Trennung von Schirm- und Konusglas sichergestellt sein. Diese Art der Behandlung ist in den Erstbehandlungsanlagen nicht flächendeckend etabliert.

Trotz der Regelung des ElektroG wird der Glasbruch aus der Behandlung von CRT-Geräten derzeit vor allem als Mischglas keiner hochwertigen Verwertung zugeführt, sondern als Bergversatz eingesetzt. Eine weitere Form der Verwertung stellt/stellte der Einsatz als Zuschlagstoff in Baustoffen (z. B. Betonbausteine zur Flächenabgrenzung in den Niederlanden) dar [4]. Dies macht/machte einen bedeutsamen Absatzweg des bleihaltigen CRT-Glases aus. Mögliche Absatzwege für Konusglas sind der Einsatz in der Bleihütte als Schlackenbildner und der Versatz unter Tage. Der Versatz unter Tage ist hierbei nur in trockenen Salzgesteinsformationen erlaubt, die über einen Langzeitsicherheitsnachweis verfügen [7].

Der Absatzweg in Bleihütten hat nur sehr begrenzte Kapazitäten. Zurzeit geben drei Verwerter von Elektroaltgeräten jeweils zwischen 500 und 1.500 t CRT-Glas jährlich an Bleihütten ab. Im

Gegensatz dazu werden jährlich bis zu 10.000 t CRT-Glas zur Verfüllung an Deponien abgegeben. Dabei erfolgt keine gezielte Trennung von Schirm- und Konusglas [10].

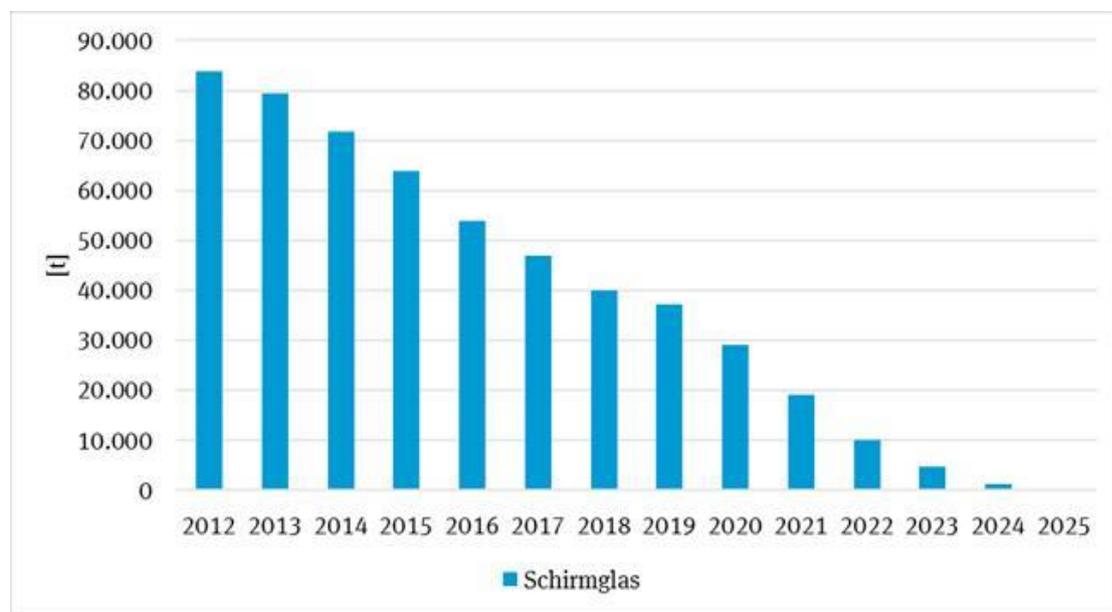
Eine Grenzwertfestlegung für die Behandlungsanforderungen 15 bis 17 für die Verwertung von Fraktionen aus der Behandlung von CRT-Geräten besteht nicht. Die Grenzwerte wurden aus der CENELEC TS 50625-3-3 übernommen. Anlagen die nach CENELEC zertifiziert sind, müssen diese Grenzwerte einhalten.

Die aus CENELEC TS 50625-3-3 übernommene Behandlungsanforderung 16 begrenzt den Maximalgehalt von Blei in der Schirmglasfraktion auf 0,5 %. Nach LAGA M 31 B sind jedoch Verfahren verfügbar bei denen mittels Röntgentechnik ein Bleigehalt der Schirmglasfraktion von < 0,1 % erreicht werden kann [7].

### Mengenpotenzial

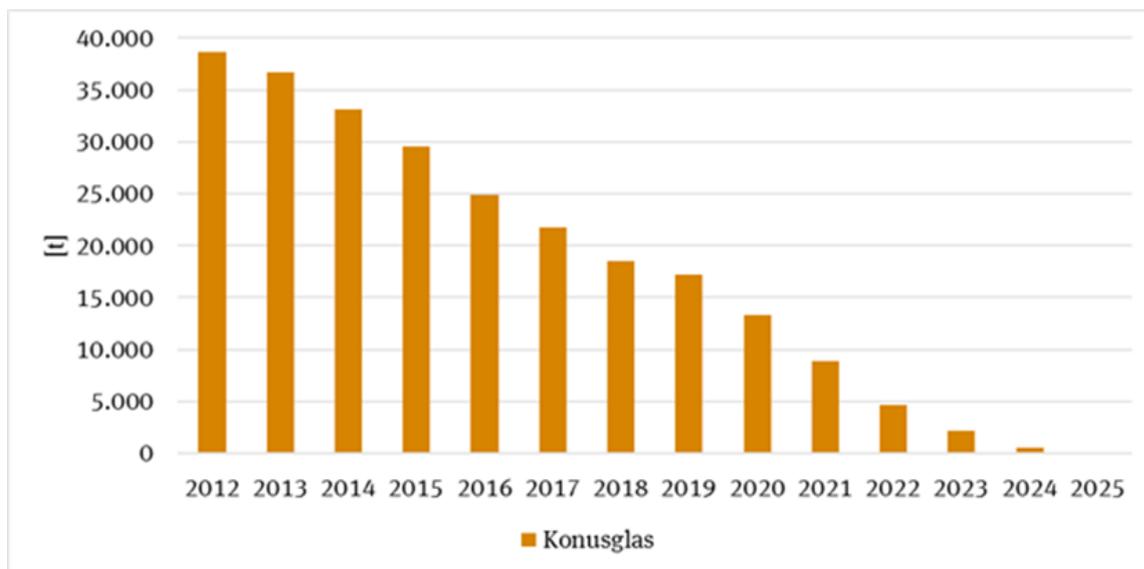
Der durchschnittliche Glasanteil in CRT-Geräten liegt bei 65 %. Das Gewicht der Röhre setzt sich zusammen aus ca. 65 % Schirmglas, 30 % Konusglas und 5 % Halsglas [63]. Das Schirmglas, welches den größten Anteil ausmacht, ist im Allgemeinen bleifrei und kann bei einer ausreichend genauen Trennung hochwertig verwertet werden. Mit der Annahme einer konstanten Glasmasse von 17,8 kg für CRT-Fernsehgeräte und 8 kg für CRT-Monitore [10], den in Verkehr gebrachten Mengen der jeweiligen Geräte in Deutschland, einer durchschnittlichen Lebensdauer von 6 Jahren für CRT-Monitore und 9 Jahre für CRT-Fernsehgeräten und einer Rücklaufquote von ca. 60 % (in den formellen Sektor) ergeben sich die in Abbildung 13 dargestellten potentiellen Schirmglasmengen, welche in Deutschland pro Jahr in die Behandlung gelangen.

**Abbildung 13: Prognose anfallender Schirmglasmengen in Deutschland pro Jahr**



In Abbildung 14 ist eine Hochrechnung der potentiell anfallenden Konusglasmengen pro Jahr dargestellt. Für die Berechnungen galten dieselben Annahmen bezüglich der Mengenverteilung von Konusglas in CRT-Geräten und Gewichtsangaben für CRT-Fernsehgeräte und -Monitore wie für Abbildung 13.

**Abbildung 14: Prognose anfallender Konusglasmengen in Deutschland pro Jahr**



Nach den Abbildungen Abbildung 13 und Abbildung 14 beträgt das Glasabfallmengenpotenzial aus CRT-Geräten ab dem Jahr 2018 bis zum prognostizierten phase-out im Jahr 2025 ungefähr 143.000 t Schirmglas und 63.500 t Konusglas.

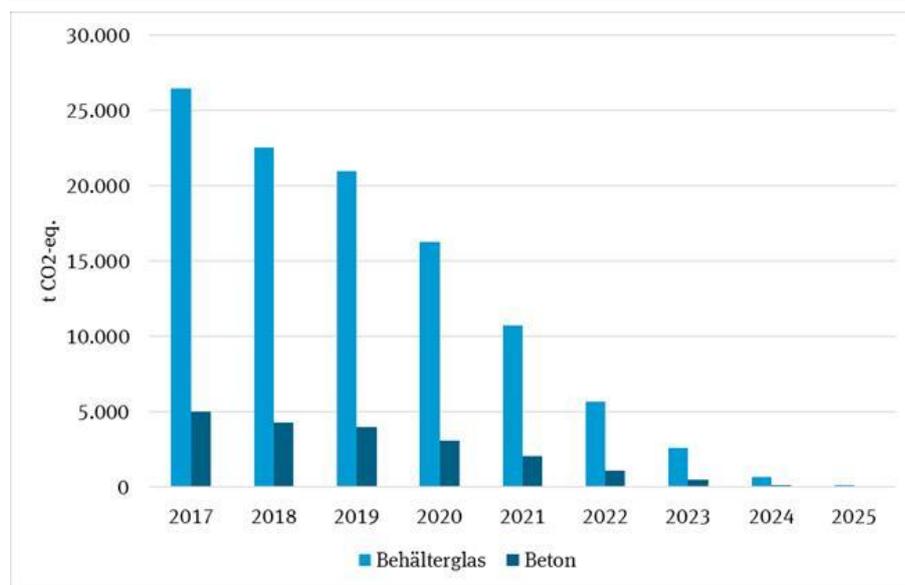
Bleihaltige Komponenten eines CRT-Geräts sind das Konusglas, das Frittenglas und das Röhrenhalsglas der Kathodenstrahlröhre. Der PbO-Gehalt des Konusglas liegt bei 20 - 24 Gew.-% der Konusglasfraktion. Frittenglas enthält ca. 80 % PbO und Röhrenhalsglas 28 - 30 % PbO.

Für die Behandlungsanforderung 15, Behandlungsanforderung 16, Behandlungsanforderung 17 und Behandlungsanforderung 18 ist die Darstellung des Mengenpotenzials nicht möglich bzw. ist keine Datengrundlage vorhanden.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Die Verwertung der Schirmglasfraktion aus CRT-Geräten ist ökologisch wesentlich vorteilhafter als die Verwertung dieser Fraktion als Bauzuschlagsstoff. Abbildung 15 beschreibt das Einsparungspotenzial in t CO<sub>2</sub> eq. je nach Verwertungsweg der in Abbildung 13 prognostizierten Schirmglasmenge (Differenz ca. 13.000 t CO<sub>2</sub> eq. im Jahr 2020). Eine Verwertung als Versatz z. B. an Stelle von Beton, würde jährlich eine weitaus geringere Einsparung an CO<sub>2</sub> eq. bedeuten, im Vergleich zur Verwertung in der Behälterglasindustrie, wodurch Primärrohstoffe in der Produktion von Behälterglas eingespart werden könnten [10]. Zusätzlich kann auch Prozesswärme eingespart werden. Je 1 % Scherben werden ca. 0,2 % vom Energiebedarf der Glasschmelzwanne eingespart.

**Abbildung 15: Einsparungspotenzial nach Verwertungsweg von Schirmglas**



Das Umweltbundesamt, die Akteure der AG und des AK sowie die Arbeitsgruppe LAGA M 31 B lehnen den Einsatz von gemischtem Bildröhrenglas oder Konusglas als Baustoff oder Betonzuschlagstoff ab. Begründet wird dies mit einer dadurch verursachten unkontrollierten Verteilung von Schadstoffen.

Blei in der Glasfraktion der CRT-Geräte ist in der Glasmatrix der Bildröhre eingebunden. Beim Zerkleinern und der Weiterverarbeitung des Glases, besteht die Möglichkeit, dass Blei z. B. über Staubpartikel in die Umwelt gelangt. Die Elution von Blei aus der Glasmatrix ist unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. auf Deponien, Straßenunterbau) möglich, so dass eine nicht ordnungsgemäße Entsorgung negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann. Die Auslaugung umweltrelevanter Stoffe wird durch eine große Oberfläche (sehr fein gemahlenes Glas), eine saure Umgebung sowie mechanische Belastung begünstigt [57].

Entsorger des AG-Treffens Bildschirmgeräte am 22.03.2017 gaben an, dass die Stabilität in einer beispielhaft betrachteten Betonanwendung eingeschränkt ist und diese mittelfristig aufbricht. Dadurch wird bleihaltiges Glas freigelegt. Der Entsorgungsweg der ausgedienten Betonbauteile ist nicht bekannt, es wird jedoch vermutet, dass diese als mineralische Bauabfälle als Wegebbaumaterial und/oder Zuschlagsstoff verwertet werden oder deponiert werden. Das Blei-Elutionsrisiko kann weder ausgeschlossen, noch quantifiziert werden.

Eine Berechnung der Bleifracht entsprechend der Prognosezahlen zum Aufkommen von Konusglas aus der Abbildung 14 und den PbO-Gehalten von CRT-Glas ergibt eine Menge von 4.650 t bis 5.800 t.

Das ökologische Gefährdungspotenzial von Blei ist in Kapitel 4.2.1 unter Behandlungsanforderung 8 Ökologische Aspekte/Motivation beschrieben.

### **Ökonomische Aspekte**

Nach Aussagen der Akteure der AG und des AK wird der Weg der Entsorgung in den Niederlanden auch von in Deutschland ansässigen Recyclingunternehmen genutzt. Ohne diesen Absatzweg wären diese nicht wettbewerbsfähig. Der Aufwand für die Behandler erhöht sich einmalig durch die Transaktionsaufwendungen bei der Umstellung der Entsorgungspfade. Über längere Zeit betrachtet wäre der Zusatzaufwand durch die Transaktionskosten als gering

anzusehen. Durch die stark zurückgehenden Mengen an CRT-Glas ist eine Umlage auf maximal 3 bis 5 Jahre realistisch [10].

Der Verwertungsweg des gemischten Bildröhrenglases im Bergversatz ist etabliert und bedeutet für die Entsorger, die diesen Pfad nutzen, keinen Mehraufwand.

Aktuelle Preis- bzw. Erlössituationen der Entsorgung von Bildschirmgläsern sind nicht veröffentlicht und unterliegen nicht zuletzt auch deswegen Geschäftsgeheimnissen, da aufgrund der zurückgehenden Mengen nur wenige Firmen beteiligt sind [10]. Eine Untersuchung der Preise zu den Entsorgungswegen für CRT-Glas nach Bleher ergab, dass eine ökologisch hochwertige Verwertung etwa dreimal so teuer ist, wie die Deponierung (Unterschied ca. 50 €/t Glas) [74].

Eine Behandlung von CRT-Bildschirmgeräten, die die vorgegebenen Grenzwerte erreicht, ist entsprechend CENELEC TS 50625-3-3 und LAGA M 31 B bezüglich des PbO-Gehalts in der Schirmglasfraktion Stand der Technik. Nach § 20 Abs. 2 ElektroG haben die Erstbehandlung und weitere Behandlungstätigkeiten nach dem Stand der Technik im Sinne des § 3 Abs. 28 KrWG zu erfolgen. Insofern entsteht den Betrieben, die Qualitätsstandards entsprechend den rechtlichen Anforderungen erfüllen, kein Zusatzaufwand im Vergleich zur Erfüllung des bestehenden Rechtsrahmens.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Wir empfehlen, die Recyclingquote der werkstofflichen Verwertung des CRT- Glases von 25 Gew.-% (siehe Behandlungsanforderung 14) auf den Einsatz in der Glasindustrie zu beziehen, sofern die Verwertung als Baumaterial (z. B. dem Einsatz als Betonzuschlagstoff) (siehe Behandlungsanforderung 18) rechtlich nicht anders ausschließbar ist.

### **CENELEC**

Behandlungsanforderung 15, Behandlungsanforderung 16 und Behandlungsanforderung 17 sind Regelungen aus der CENELEC TS 50625-3-3. Bezüglich Behandlungsanforderung 16 fordert CENELEC TS 50625-3-3 einen maximalen PbO-Gehalt der Schirmglasfraktion von 0,5 %.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Zu den Behandlungsanforderung 13, Behandlungsanforderung 14, Behandlungsanforderung 15, Behandlungsanforderung 16 und Behandlungsanforderung 17 gibt es derzeit nach unserem Kenntnisstand keine Regelungen in anderen Staaten.

Gemäß Abschnitt 2 § 16 Absatz 3 Nr. 2 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung ist eine Verwendung von Glasfraktionen aus der Behandlung von EAG, aufgrund eines als gefährlich einzustufenden Gehaltes an Pb, zur Herstellung von Baustoffen und als Bauzuschlagstoff unzulässig.

Nach Teil II Richtlinie 2 Abschnitt 2.3 und 2.4 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling, muss Bildschirmglas nach Möglichkeit in der Bildröhrenherstellung stofflich verwertet werden. Wenn dies nachweislich nicht möglich ist, ist die stoffliche Verwertung von Schirm-, Konus-, oder Mischglas in anderen Verwertungsprozessen zulässig. Schadstoffe (z.B. Blei) dürfen dabei nicht in Anwendungen gelangen, in denen sie nicht technisch notwendig sind.

### **Position AG und AK**

Zu den Behandlungsanforderung 13 und Behandlungsanforderung 14 merkte die AG an, dass CRT-Geräte einen auslaufenden Stoffstrom darstellen. Das Bildröhrenglas wird als Bergversatz verwertet. Wenn diese Nische wegfällt, sind die Akteure nicht mehr bereit in einen auslaufenden

Stoffstrom zu investieren. Zudem wurde hinterfragt inwiefern der Markt noch die Mengenkapazitäten zur Trennung von Konusglas und Schirmglas besitzt, da derzeit nur noch 2 Anlagen in Deutschland betrieben werden.

Bezüglich des Bleigehalts in der Schirmglasfraktion (Behandlungsanforderung 16) wurde in der AG angemerkt, dass sich nach den Anforderungen der Abnehmer der Glasfraktion gerichtet werden müsste. Je nach Endspezifikation /Anforderungen sind unterschiedliche Bleigehalte zulässig. In der Keramikindustrie sind es 0,25 ppm, in der Behälterglasindustrie 0,03 ppm. Es wurde hinzugefügt, dass ein Grenzwert von 0,1 % nicht ausreichend streng wäre, um die Verwertung in der Behälterglasindustrie zu realisieren.

Den Behandlungsanforderung 15 und Behandlungsanforderung 17 wurde zugestimmt.

Der Behandlungsanforderung 18 wurde zugestimmt. Die Akteure unterstützen die Aussage des UBA, dass der Verwertungsweg des CRT-Glas in die Niederlande zur dortigen Verwendung als Zuschlagstoff für Betonbausteine kritisch zu sehen ist. Einige Akteure sprachen sich für ein Verbringungsverbot innerhalb der EU aus. Eine Verwendung von Pb-haltigem CRT-Glas als Baumaterial ist zu unterbinden, da dieser momentan massenmäßig der bedeutendste sei. Auch deutsche Firmen nutzen diesen Verwertungsweg (über die Niederlande). Ohne diesen Absatzweg wäre das Unternehmen nicht überlebens-fähig. Dies wurde von anderen Akteuren bekräftigt.

#### 4.2.3 Flachbildschirm-Geräte

**Behandlungsanforderung 19:** Erzeugung einer separaten Lampenfraktion bei FBS-Geräten mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung

**Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher und Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 20:** Getrennte Folgebehandlung von FBS-Geräten und Hg-haltigen Lampen

**Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette; Folgebehandler

**Monitoring:**

Überprüfung über die Anlagengenehmigung; Überprüfung der Betriebstagebücher und Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

## **Behandlungsanforderung 21: Lagerung von Lampenbruch aus FBS-Geräten in dicht verschlossenem Gebinde**

### **Adressat:**

EBA

### **Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

### **Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

### **Ökologischer Aspekt:**

Mittel bis Hoch

## **Bestehender Rechtsrahmen**

Gemäß Anlage 4 Nr. 1a und i ElektroG müssen quecksilberhaltige Bauteile wie Schalter oder Lampen für Hintergrundbeleuchtung sowie Gasentladungslampen aus EAG entfernt werden. Es besteht derzeit keine rechtliche Vorgabe, die eine gemeinsame Folgebehandlung von FBS-Geräten und Lampen verbietet. Gemäß Anlage 4 Nr. 8 ElektroG sind Gasentladungslampen ausreichend gegen Bruch gesichert zu lagern und zu transportieren. Des Weiteren sind Lampen gemäß Anlage 5 Nr. 2b und d in geeigneten Bereichen mit undurchlässiger Oberfläche und wasserundurchlässiger Abdeckung sowie in geeigneten Behältern zu lagern. Eine Vorgabe zur Lagerung des Lampenbruchs in dicht verschlossenen Gebinden besteht nicht.

## **Status Quo**

Quecksilberhaltige Lampen aus der Hintergrundbeleuchtung von Flachbildschirmen werden gemäß den Vorgaben des ElektroG von den Behandlern aus den Geräten entfernt. Eine bruchfreie Entnahme der Lampen kann nicht immer realisiert werden aufgrund verschiedener Verbindungstechniken der CCFL-Lampen mit dem Gerät. Eine separate Lampenfraktion wird erzeugt. Nachdem die CCFL-Röhren aus den Geräten entnommen wurden, werden sie in einem Behälter gesammelt, um sie anschließend in eine entsprechende Verwertung oder Entsorgung von quecksilberhaltigen Materialien geben zu können. Die Lagerung der Hg-haltigen Hintergrundbeleuchtung aus FBS-Geräten erfolgt teilweise in offenen Behältern. Diese Behälter können entweder intakte, teilzerstörte oder vollständig zerstörte Röhren enthalten. Um mögliche Emissionen von offenen Sammelbehältern oder Füll- und Umfüllvorgänge von geschlossenen Sammelbehältern beurteilen zu können, wurden Messungen im IUTA gemacht [9].

Verfahren zu einer gemeinsamen Folgebehandlung von Lampen sind nicht bekannt.

## **Mengenpotenzial**

Flachbildschirmmonitore enthalten in der Regel zwei Hg-haltige CCFL-Röhren.

Flachbildschirmfernsehgeräte enthalten je nach Größe des Gerätes durchschnittlich 16 bis maximal 50 CCFL-Röhren. Bei einem durchschnittlichen Hg-Gehalt von 4 mg/Hg pro CCFL-Röhre ist somit mit Quecksilbergehalten in ganzen FBS-Geräten zwischen 8 mg (Monitor) bzw. 64 mg bis > 200 mg (Fernseher) zu rechnen [9].

Bezüglich der Behandlungsanforderung 21 ergab, nach den Messungen des IUTA, eine 3-minütige Messung des Hg-Gehalts direkt oberhalb eines Sammelbehälters für CCFL-Röhren einen durchschnittlichen Quecksilberkonzentrationswert von 660,0 µg/m<sup>3</sup>. Der maximal gemessene Wert lag bei 1093,0 µg/m<sup>3</sup> [9].

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Durch die Umsetzung dieser Empfehlungen kann der diffuse Austrag von Quecksilber und die Schadstoffanreicherung, -verteilung und -verschleppung in andere Fraktionen weitestgehend vermieden oder zumindest reduziert werden. Weitere Aspekte zum ökologischen Gefährdungspotenzial von Quecksilber sind in Kapitel 4.2.1 unter Behandlungsanforderung 8 Ökologische Aspekte/Motivation beschrieben.

### **Ökonomische Aspekte**

In den derzeit etablierten Behandlungsverfahren für Flachbildschirmgeräte wird in der Prozesskette der Schadstoffentfrachtung eine separate Lampenfraktion erzeugt. Diese wird in entsprechenden Behältnissen gelagert und an Erstbehandlungsanlagen für Lampen zur weiteren Aufbereitung weitergegeben. Dementsprechend entsteht für die Behandlungsanforderung 19 und Behandlungsanforderung 20 kein Mehraufwand.

Bei der Nutzung von Behältern, die für die Lagerung der Altlampen verschlossen sind, ergibt sich ein Zusatzaufwand für das Öffnen und Verschließen der Behälter beim Einfüllen der Altlampen. Der Zusatzaufwand wird in der Praxis als gering eingeschätzt, da die Anzahl der Befüllungsvorgänge gering ist.

Die Lagerung von Lampenbruch zur Übergabe an Lampenbehandlungsanlagen in dicht verschlossenen Gebinden ist etabliert. Der Aufwand ist als gering einzuschätzen, da diese Anforderung bereits Teil der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung ist.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Eine Ausnahme bilden Flachbildschirmgeräte, welche aufgrund ihres Beschädigungsgrades von einigen Entsorgern, aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, in Anlagen gegeben werden, die mit dem „BluBox-Verfahren“ arbeiten. In diesem Verfahren werden aus den ganzen Flachbildschirmen mehrere separate Fraktionen erzeugt, ohne dass eine separate Lampenfraktion erzeugt wird. In diesem Fall würden die Behandlungsanforderung 19 und Behandlungsanforderung 20 einen Technologieausschluss bedeuten. Für vollautomatische Zerlegeverfahren von Flachbildschirmgeräten mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung sollte in diesem Fall eine Ausnahmeregelung bzgl. der Behandlungsanforderungen 19 und 20 getroffen werden, wenn es durch diese Verfahren nachweislich zu keinen schädlichen Umweltauswirkungen, keinen zusätzlichen Schadstoffemissionen und keiner Beeinträchtigung der Verwertbarkeit der Outputfraktionen kommt.

Thullner et al. und LAGA M 31 B empfehlen zusätzlich die Zugabe von Aktivkohle in den Sammelbehälter für Lampenbruch. So können Quecksilberdampfemissionen um bis zu 80 % reduziert werden [7, 75]. Die Zugabe von Aktivkohle in den Sammelbehälter wäre dem Arbeits- und Gesundheitsschutz zuträglich, bedeutet allerdings einen als gering einzuschätzenden Mehraufwand. Inwiefern die Aktivkohle in der nachfolgenden Lampenaufbereitung als Störstoff zu bewerten ist, ist nicht bekannt. Der Aspekt soll im Folgevorhaben geklärt werden.

### **CENELEC**

Gemäß CENELEC EN 50625-2-2, Abschnitt 5.10.2 FPD-Geräte, darf die Hg-haltige Hintergrundbeleuchtung aus der manuellen Zerlegung von Flachbildschirmgeräten nur in speziellen Lampenbehandlungsanlagen behandelt werden oder ist entsprechend der nationalen Gesetzgebung ordnungsgemäß zu beseitigen.

Zu den Behandlungsanforderung 19 und Behandlungsanforderung 21 werden in den CENELEC-Normen keine Anforderungen getroffen.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Gemäß Abschnitt 2 § 6 Absatz 2 Nr. 2 und 11 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung, sind quecksilberhaltige Bauteile und Lampen für die Hintergrundbeleuchtung sowie Gasentladungslampen aus EAG zu entfernen und ordnungsgemäß zu behandeln. Nach § 4 Absatz 6 sind gebrochene Lampen und Hg-haltige Fraktionen aus der Behandlung von Flachbildschirmen in durchstichfesten, dicht verschlossenen Gebinden zur Verhinderung von Quecksilber- und Staubemissionen zu lagern. Laut § 15 Absatz 2 ist eine gemeinsame Behandlung von Lampen und Flachbildschirmen nicht zulässig. Beide Abfallarten sind in getrennten Chargen zu behandeln.

Gemäß Teil I Abschnitt D.6.1 der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling, sind Hg-haltige Komponenten grundsätzlich zu entfernen und einer separaten Entsorgung zuzuführen. Teil II Richtlinie 2 Abschnitt 1.2 regelt, dass Kaltkathodenfluoreszenzlampen aus der Hintergrundbeleuchtung von Flachbildschirmen entfernt und fachgerecht verwertet oder entsorgt werden müssen. Nach Teil II Richtlinie 2 Abschnitt 1.4 müssen zerbrochene Kaltkathodenfluoreszenzlampen aus Hintergrundbeleuchtungen in separaten geschlossenen Behältern aufbewahrt und transportiert werden.

### Position AG und AK

In der AG und im AK wurde den Behandlungsanforderungen zugestimmt.

#### **Behandlungsanforderung 22:** Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten und werkstoffliche Verwertung

##### **Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

##### **Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher und Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

##### **Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

##### **Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Es besteht derzeit keine rechtliche Vorgabe, die eine Separierung der PMMA- und PC-Scheiben aus FBS-Geräten sowie deren werkstoffliche Verwertung vorschreibt.

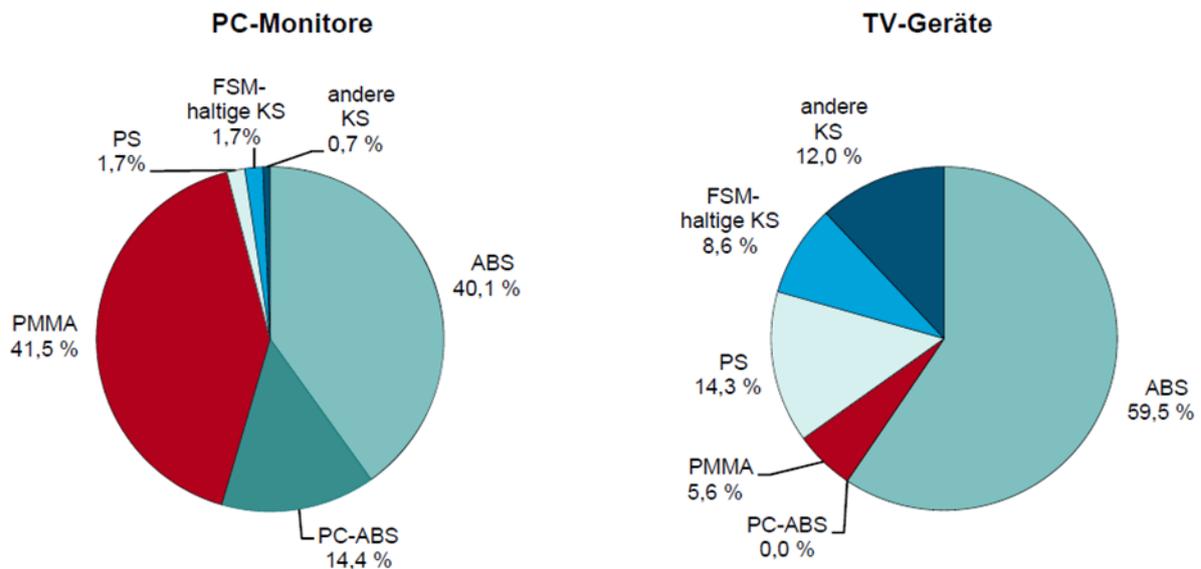
### Status Quo

Eine Separierung und werkstoffliche Verwertung finden nicht immer statt. Bei den großtechnisch etablierten Behandlungsverfahren werden im Zuge der Schadstoffentfrachtung der Hg-haltigen Hintergrundbeleuchtung die Bildschirme manuell oder teilautomatisch zerlegt. Dabei werden die Front, das Display und Bauteile vom Gerät demontiert bzw. wird das Display aus dem Gehäuse herausgeschnitten. Anschließend werden die Bauteile separiert in Kunststoffe, Leiterplatten, eine Fe-Metallfraktion und eine NE-Metallfraktion. Wenn andere schadstofffreie Hintergrundbeleuchtungen oder schadstofffreie Displays vorhanden sind, kann über einen Grobaufschluss mit anschließender Sortierung eine Separation erfolgen.

## Mengenpotenzial

Flachbildschirmgeräte bestehen etwa zu einem Drittel aus Kunststoffen [76]. Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, beinhalten Flachbildschirm-Monitore, gemessen am Anteil aller in FBS-Geräten vorkommenden Kunststoffe, bis zu 41,5 % PMMA. TV-Geräte enthalten ca. 5,6 % PMMA. Nach Wäger et al. weisen LCD-Monitore ca. 20 % PC auf [77].

**Abbildung 16: Anteile verschiedener Kunststoffarten in Flachbildschirmgeräten [76]**



Entgegen dem Erwartungshorizont sind PMMA Scheiben in LED Bildschirmen nicht in den vermuteten Mengen enthalten. Behandler finden zunehmend dünnere PMMA-Scheiben, folienartige bis kaum vorhandenes PMMA in LED-FBS-Geräten. In CCFL-FBS-Geräten jedoch sind stets dicke PMMA-Scheiben vorhanden [10].

Im Rahmen des SV-Gutachtens nach Wolf et al. wurden die Streuscheiben von LCD-Fernsehgeräten nach Kunststoffart und Gewichtsanteil untersucht. Im Ergebnis ist festzustellen, dass die PC-Scheiben der untersuchten Geräte ein durchschnittliches Gewicht von 400 g bis 650 g aufweisen und die PMMA-Scheiben 1.000 g bis 1.850 g [9].

Nach Sander et al. ergibt sich aus der Menge von 9,4 Millionen Altflachbildschirmen im Jahr 2020 ein Abfallpotenzial von 3.000 t PMMA/PC im Jahr 2020, unter der Annahme das ein Drittel der Geräte eine 1 kg schwere PMMA- bzw. PC-Scheibe enthalten [10].

Das Gesamt mengenpotenzial an Kunststoffen in Flachbildschirmgeräten ist in Kapitel 1384.4.1 unter Mengenpotenzial der Flachbildschirmgeräte beschrieben.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Durch die Separierung und werkstoffliche Verwertung erfolgt die Kreislaufschließung für ökologisch wertvolle Kunststoffe mit einem vergleichsweise hohen spezifischen GWP.

PMMA sollte nach LAGA M 31 B möglichst sortenrein wiedergewonnen und stofflich verwertet werden. Kunststoffbestandteile des Displays wie PMMA können in allen LCD-Technologien vorhanden sein. Laut Plastics Europe ist PMMA zu 100 % recycelbar [78]. Für eine hohe Sortenreinheit wird eine manuelle Separierung empfohlen [10]. Die separierten Polarisationsfolien und Streuscheiben bestehen jeweils aus hochwertigen, reinen Kunststoffen und können an geeignete Kunststoffrecycling Betriebe zur weiteren Rohstoffgenerierung

abgegeben werden nach Aussagen eines Teilnehmers beim 2. AG 2-Treffen. LCD-Flachbildschirmgeräte mit LED-Hintergrundbeleuchtung enthalten nach den Erfahrungen von IUTA immer dicke, durchsichtige Streuscheiben [9]. Weiterhin spricht für eine Separation, dass PMMA in der PC/ABS-Kunststofffraktion die physikalischen Eigenschaften des Kunststoffzyklats verschlechtert [79].

Das spezifische GWP für die Herstellung von PMMA liegt zwischen 4,38 und 4,77 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg, je nachdem ob die Scheibe aus einem Block herausgepresst wurde oder im Ganzen gegossen wurde [78]. Davon ausgehend, dass in einem FBS-Gerät 1 kg PMMA enthalten ist, ist die ökologische Relevanz des PMMA ca. um den Faktor 3 größer als die des Goldes in der Leiterplatte. Zum Vergleich: Das GWP von Gold beträgt 12.500 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg bei einem Goldgehalt in der Leiterplatte von 130 mg/kg und einem Leiterplattengewicht von rund 1 kg je FBS-Gerät [10].

Im Vergleich von unterschiedlichen Entsorgungswegen ist bei den Kunststoffen von Bedeutung, welche Eigenschaften der Kunststoffe jeweils genutzt werden können. Eine grobe Annäherung hieran liefert die Betrachtung der Nutzung der Energieaufwände, die für die Herstellung der Kunststoffe notwendig sind. Bei einer werkstofflichen Verwertung werden diese „Energieinvestitionen“ zu großen Anteilen weiter genutzt, bei einer energetischen Verwertung gehen sie verloren (es wird nur der Heizwert der Kunststoffe genutzt). Die Gesamtenergiegehalte liegen mit 116 bis 130 MJ/kg für PMMA und 100 bis 108 MJ/kg für PC [78] um mehr als den Faktor 3 höher als die unteren Heizwerte<sup>6</sup>. Nach Berechnungen von Sander et al. ergibt sich aus dem Abfallpotenzial von 3.000 t PMMA/PC im Jahr 2020 (s. o.) ein Energieeinsparungspotenzial von 279.000 GJ durch die werkstoffliche Verwertung im Vergleich zur energetischen Verwertung [10]. Dies entspricht dem jährlichen Energieverbrauch von ca. 1.000 Personen in Deutschland.

### **Ökonomische Aspekte**

Zur Entfrachtung der Hg-haltigen Hintergrundbeleuchtung von Flachbildschirmgeräten ist die schonende manuelle oder ggf. teilautomatisierte Trennung notwendig und auch etabliert. Der Zusatzaufwand, bei diesem Verfahren auch die PMMA-/PC-Scheiben zu separieren wird als sehr gering eingeschätzt. Auch im teils für beschädigte Flachbildschirmgeräte angewandten „BluBox-Verfahren“, wird PMMA als separate Fraktion erzeugt.

Bei nicht-Hg-haltigen FBS-Geräten kann eine manuelle Entnahme erfolgen oder die Separation erfolgt nach einem schonenden Grobaufschluss. Mit dem zukünftigen Rückgang Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtungen in alten FBS-Geräten wird dieses vergleichsweise in Bezug auf die PMMA-/PC-Scheiben etwas aufwendigere Separationsvorgehen zunehmen.

Die enthaltenen PMMA-Streuscheiben lassen sich gut vermarkten. Sie lassen sich gut manuell entnehmen und sind aufgrund ihrer Größe und Verbreitung mengenrelevant [9].

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-2 / TS 50625-3-3 treffen keine Anforderungen zur Separation der PMMA- und PC-Kunststofffolien.

<sup>6</sup> Der untere Heizwert gibt an, wie viel Energie in Form von Wärme bei der Verbrennung pro Kilogramm des Stoffs gewonnen werden kann. Anders als beim Brennwert wird hierbei angenommen, dass die entstehenden Verbrennungsgase zwar auf 25 °C abgekühlt werden, der enthaltene Wasserdampf aber nicht kondensiert wird, die Anlage also gasförmig verlässt.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

In anderen Staaten existieren nach unserem Kenntnisstand derzeit keine Regelungen zur Separierung der PMMA- und PC-Scheiben aus FBS-Geräten.

### Position AG und AK

In der AG und im AK wurde der Behandlungsanforderung zugestimmt.

**Behandlungsanforderung 23:** Alle Fraktionen aus FBS-Geräten zur Verwertung (ausgenommen Lampenglas) dürfen einen Grenzwert von maximal 0,5 mg Quecksilber / kg nicht überschreiten

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Betriebstagebücher und der Dokumente zu den Analysen durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde. Eine Bestätigung der Annahme bei einem Entsorgungsverfahren, das die maximalen Hg-Gehalte routinemäßig überprüft, ist ausreichend.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering bis Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-3

## Bestehender Rechtsrahmen

Gemäß Anlage 4 Nr. 6 ElektroG ist bei der Aufbereitung von Lampen zur Verwertung als Altglas ein Quecksilbergehalt von höchstens 5 Milligramm je Kilogramm Altglas einzuhalten. Weitere rechtliche Vorgaben zu Quecksilber-Grenzwerten aus der FBS-Gerätebehandlung bestehen derzeit nicht.

### Status Quo

Ein festgelegter Grenzwert für die Verwertung von Fraktionen aus der Behandlung von FBS-Geräten besteht nicht. Nach CENELEC zertifizierte Anlagen müssen den Grenzwert nach CENELEC TS 50625-3-3 einhalten. Untersuchungen des IUTA im Rahmen des SV-Gutachten zeigen, dass sich insbesondere in beschädigten LCD-Geräten Quecksilber im Gerät anlagert. Die maximal gemessene Hg-Konzentration aus den Untersuchungen unterschritt jedoch den in der Behandlungsanforderung empfohlenen Grenzwert um das 5-fache (vgl. Tabelle 16, Kapitel 4.2.1 unter Ökologische Aspekte/Motivation) [9].

### Mengenpotenzial

Nach verschiedenen Angaben variieren die Quecksilbergehalte der CCFL-Röhren in FBS-Geräten zwischen 2,5 und 10 mg pro Röhre, wobei Werte zwischen 3 und 5 mg als üblich gelten. Monitore weisen in der Regel 1 oder 2 Röhren auf. Fernseher enthalten durchschnittlich 16 Röhren bis mehr als 50 Röhren bei großen Geräten. Die Anzahl der Röhren nimmt dabei mit der Größe des Fernsehers zu [9]. Aus den genannten Zahlen ergeben sich demnach pro Fernsehgerät Quecksilbermengen (Annahme durchschnittlich 4 mg pro CCFL-Röhre) von 64 mg bei kleinen Geräten bis mehr als 200 mg bei großen Geräten.

Nach Wolf et al. wurden im Rahmen des Projekts Untersuchungen des IUTA gemacht, bei denen der Hg-Gehalt in beschädigten Flachbildschirmgeräten gemessen wurde. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 16, Kapitel 4.2.1 unter Ökologische Aspekte/Motivation

dargestellt. Die Hg-Messwerte in den Geräten variierten in der durchschnittlichen Konzentration von  $2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  bis  $23,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die maximal gemessenen Konzentrationen bewegten sich zwischen  $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und  $95,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Eine Datengrundlage, welche die Schadstoffverschleppung quantifiziert, liegt nicht vor.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

In FBS-Geräten mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung kann sich Quecksilber anlagern. Besonders in beschädigten Geräten mit teils oder ganz zerstörter Hintergrundbeleuchtung ist der Hg-Gehalt deutlich erhöht. Auch in Geräten, die keine zerbrochenen Lampen enthalten lagert sich Quecksilber durch diffuse Schadstoffausträge aus CCFL-haltigen Geräten an [9]. Ein Hg-Grenzwert für alle Fraktionen aus FBS-Geräten zur Verwertung reduziert die Verschleppung und Verteilung von Hg und führt zu einer Erhöhung des werkstofflichen Verwertungspotenzials, da kontaminierte Fraktionen bei Überschreitung des Grenzwertes nicht mehr werkstofflich verwertet werden können.

### **Ökonomische Aspekte**

Gegebenenfalls müssen zusätzliche chemische Analysen auf Quecksilber durchgeführt werden, was einen als gering einzuschätzenden Mehraufwand mit sich bringen würde. Diese Analysen können in längeren Abständen erfolgen, insofern die angewandten Behandlungsverfahren die verfahrensbezogenen Anforderungen erfüllen und nicht verändert werden.

### **CENELEC**

In CENELEC TS 50625-3-3 werden in Abschnitt 8.5 Grenzwerte für einen mechanischen Behandlungsprozess für die schadstoffentfrachtete, feinste zerkleinerte Mischfraktion angegeben. Es gilt ein Quecksilber-Grenzwert von maximal  $0,5 \text{ mg}/\text{kg}$  Trockenmasse.

Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Gemäß Abschnitt 2 § 15 Absatz 8 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung sind Flachbildschirme so zu behandeln, dass der Hg-Gehalt der Fraktionen zur Verwertung  $0,5 \text{ mg}/\text{kg}$  Trockenmasse nicht übersteigt.

Gemäß Teil II Richtlinie 2 Abschnitt 1.5 b) der Technischen Vorschriften zur Verwertung von EAG von SENS/SWICO Recycling muss bei der mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen mit CCFL sichergestellt werden, dass: Die Glasfraktionen für eine stoffliche Verwertung nicht mehr als  $5 \text{ mg}$  Quecksilber pro  $\text{kg}$  Trockensubstanz (TS) enthalten; die Metallfraktionen für die stoffliche Verwertung nicht mehr als  $10 \text{ mg}$  Quecksilber pro  $\text{kg}$  Trockensubstanz (TS) enthalten und alle weiteren Fraktionen, die nicht in eine Sonderabfalldeponie eingelagert werden, nicht mehr als  $10 \text{ mg}$  Quecksilber pro  $\text{kg}$  Trockensubstanz (TS) enthalten.

### **Position AG und AK**

Die AG und der AK haben der Behandlungsanforderung zugestimmt.

**Behandlungsanforderung 24:** 2025: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung des Indiums aus FBS-Geräten, wenn im Jahr 2022 Anlagen in Deutschland zur Verfügung stehen

**Adressat:**

EBA als Verantwortlicher für die Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Empfehlungen zum Monitoring können auf der Grundlage der Analyse von durchzuführenden Verfahrensketten entwickelt werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**Bestehender Rechtsrahmen**

Es besteht derzeit keine rechtliche Vorgabe, die eine Rückgewinnung von Indium aus FBS-Geräten vorschreibt.

**Status Quo**

Indium wird in allen Paneelen als Indium-Zinn-Oxid (ITO-Schicht) in Flachbildschirmen eingesetzt [9]. Hauptsächlich findet es Verwendung in LCD-Bildschirmen und in Touchscreens. Die ITO-Schicht ist nur einige Hundert Nanometer dick.

Das Recycling von ITO-Produktionsabfällen ist großtechnisch etabliert, die Separation von Indium aus Altprodukten jedoch noch im Versuchsstadium. Ein Rückgewinnungsprozess von Indium aus Flachbildschirmen im industriellen Maßstab wird derzeit noch nicht angewandt.

**Mengenpotenzial**

Nach Wolf et al. liegen mehrere Studien bzw. Untersuchungen zu den Indiumgehalten in Flachbildschirmen vor. In Tabelle 19 ist der Anteil des LCD-Panels am Gesamtgewicht verschieden großer LCD-CCFL Fernsehgeräte und LCD-CCFL-Monitore dargestellt. Die Daten beruhen auf mehreren Untersuchungen verschiedener Akteure und wurden in Wolf et al. zusammengestellt [9].

**Tabelle 19: Masse der LCD-Panels in LCD-Fernsehgeräten und Monitoren nach verschiedenen Untersuchungen (eigene veränderte Darstellung, UBA)**

Fraktion	IUTA 2009	Böni 2011	Böni 2015
Datengrundlage	LCD-CCFL-Fernseher	Datengrundlage	LCD-CCFL-Fernseher
Durchschnittsgewicht (kg)	12,6	15	16
Panel (%)	8	6	8,1
Datengrundlage	LCD-CCFL-Monitore 10'' – 27''	LCD-CCFL-Monitore	LCD-CCFL-Monitore 17'' – 19''
Durchschnittsgewicht (kg)	4,5	4,5	5,15
Panel (%)	7,3	9,5	7,7

In Tabelle 20 ist jeweils der durchschnittliche Indiumgehalt in LCD-Panels der Untersuchungen sowie weitere Werte anderer Quellen zusammengefasst.

**Tabelle 20: Übersicht der Indiumgehalte in LCD-Panels nach [9]**

Quelle	In-Gehalt in LCD-Panel in %
Wang 2009	0,0102
FEM/IUTA 2011	0,0174
Götze 2012	0,0195
Böni 2015	0,0199
Durchschnitt	0,01675

Bei LCD-Fernsehgeräten ergibt sich bei einem durchschnittlichen Panelanteil von 7,4 % je Gerät (vgl. Tabelle 19) mit einem durchschnittlichen Indiumgehalt von 0,01675 % (vgl. Tabelle 19) je Panel, ein durchschnittlicher Anteil von Indium von ca. 0,00124 % Indium bezogen auf das Gesamtgerät. Bei einem Gerätegewicht von 14,5 kg (vgl. Tabelle 18) sind somit in einem Fernseher-LCD-Panel durchschnittlich 180 mg Indium enthalten [9]. Diese errechneten Werte können lediglich als Richtwerte dienen.

Bei LCD-Monitoren ergibt sich bei einem durchschnittlichen Panelanteil von 8,2 % je Gerät (vgl. Tabelle 19) mit einem durchschnittlichen Indiumgehalt von 0,01675 % (vgl. Tabelle 20) je Panel, ein durchschnittlicher Anteil von Indium von ca. 0,00137 % Indium bezogen auf das Gesamtgerät. Bei einem Gerätegewicht von 4,3 kg (vgl. Tabelle 19) sind somit in einem Monitor-LCD-Panel durchschnittlich 60 mg Indium enthalten [9]. Diese errechneten Werte können lediglich als Richtwerte dienen.

In LCD-LED-Geräten ist Indium zusätzlich in der Hintergrundbeleuchtung enthalten. In den LEDs sind je nach Chipgröße durchschnittlich 29 - 170 µg Indium enthalten. Verschiedenen Angaben nach sind im Durchschnitt 150 LEDs in Fernsehern und 100 LEDs in Monitoren verbaut. Hieraus ergeben sich 4,4 - 25,5 mg Indium zusätzlich in LCD-LED-F Fernsehern und 2,9 - 17 mg in LCD-LED-Monitoren. Auch diese Angaben können nur als Richtwert dienen [9, 24, 80].

In Tabelle 21 sind die Indiumgehalte verschiedener LCD-Anwendungen nach Eckstein et al. dargestellt [62].

**Tabelle 21: Indiumgehalte in LCD-Anwendungen (eigene Darstellung nach [62])**

Indium-Gehalte in LCD	
LCD-Fernseher	ca. 260 mg
LCD-Monitore	ca. 80 mg
Notebook Display	ca. 40 mg
oLED	ca. 50 % weniger, da nur eine ITO-Schicht

Zum Indiumpotenzial aus Flachbildschirmen variieren die Literaturangaben. Buchert et al. schätzen die Menge von Indium in Flachbildschirmen, die im Jahr 2010 verkauft wurden, mit 206 kg ab [80]. Im UBA-Projekt RePro wurde das Indiumpotenzial für das Jahr 2012 in Flachbildschirmen auf 1 bis 3 t geschätzt [10]. Dies entspricht 0,1 bis 0,5 % der Weltjahresproduktion.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Durch die Rückgewinnung von Indium kann die Primärproduktionen des Stoffes mit einem sehr hohen GWP-Wert verringert werden. Der GWP-Werte von Indium liegt bei 102 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg [34].

Die Primärproduktion von Indium weist eine vergleichsweise gute Umweltbilanz auf und liegt wesentlich in der Tatsache begründet, dass Indium als Nebenprodukt (Koppelprodukt) der Zinkgewinnung anfällt. Die positiven Auswirkungen auf die Umwelt, bei Verringerung des primären In-Bedarfs durch das Recycling sind daher gering [81]. Es besteht jedoch eine Intensivierung des Zinkrecyclings. Sollte sich dieses weiter durchsetzen, so muss auch das Recycling von In weiterentwickelt werden [23].

Die ökologischen Untersuchungen zeigten nur geringe ökologische Vorteilhaftigkeit des Indiumrecyclings aus Bildschirmen [23]. Unter der Voraussetzung, dass die Indiumnachfrage die Koppelproduktmenge nicht übersteigt, 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 [23].

## Ökonomische Aspekte

Indium steht auf der Liste der EU-Kommission zu Critical Raw Materials [16]. Das heißt für diesen Stoff besteht eine hohe wirtschaftliche Relevanz bei gleichzeitig unsicherer Versorgungssicherheit. Durch die Rückgewinnung von Indium aus Flachbildschirmdisplays kann zur Versorgungssicherheit beigetragen werden. Aufgrund des hohen prognostizierten Abfallpotenzials an Flachbildschirmen besteht ein hohes Ressourcenpotenzial für Indium. Für In besteht eine starke Nachfrage in der Elektronikindustrie.

Eine Neuausrichtung der Behandlungsverfahren zur Rückgewinnung von Indium wäre mit erhöhtem Kostenaufwand im Vergleich zur Nicht-Rückgewinnung verbunden.

Reuter et al. nennt für Indium eine globale Produktionsmenge für 2006 von 581 t [31], USGS für das Jahr 2017 von 720 t und für 2016 von 680 t [82]. Eine Rückgewinnung wird angesichts der dargestellten Mengenverhältnisse vor allem dann sinnvoll sein, wenn eine Zusammenführung von Stoffströmen aus anderen Quellen realisiert werden kann (siehe auch [36]). Eine andere Quelle für Indium stellen CI(G)S-Photovoltaikmodule dar. In Form von InGaN-Verbindungen wird Indium in bisher geringen Mengen, aber mit zunehmender Bedeutung auch in speziellen LEDs eingesetzt [10].

Der Indiumgehalt der LCD-Flachbildschirmgeräte ist sehr gering, sodass eine Rückgewinnung dieses Zielelements derzeit nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Sollte sich diese Situation in Zukunft ändern, ist eine manuelle Demontage der mechanischen Zerkleinerung vorzuziehen, da das Indium durch den Einfluss der mechanischen Zerkleinerung des gesamten Gerätes in andere Fraktionen als jene der Panels verschleppt werden kann [9].

## CENELEC

In CENELEC EN 50625-2-2 / TS 50625-3-3 wird die Rückgewinnung von Indium nicht thematisiert.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Es gibt nach unserem Kenntnisstand derzeit keine Vorschriften zur Rückgewinnung von Indium in anderen Staaten.

### **Position AG und AK**

Die Anforderung zur Rückgewinnung von Indium ist in der AG und im AK nicht diskutiert worden, da diese erst nachträglich aufgenommen wurde.

## 4.3 AG 3 – Photovoltaikmodule

**Behandlungsanforderung 25:** Bruch sichere Entladung, Lagerung der PV-Module und Umgang mit den PV-Modulen sowie kein Vorbrechen oder Verdichten der PV-Module vor der Sortierung und Erstbehandlung

**Adressat:**

EBA (muss auch für Annahmestelle, Beauftragter zur Demontage der Module gelten)

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering bis Hoch (Vergleiche ökonomische Aspekte)

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Spezifische rechtliche Vorgaben zum Umgang und zur Entladung, Lagerung, dem Vorbrechen oder Verdichten von PV-Modulen bestehen nicht. Jedoch ist gemäß Anlage 4 Nr. 1 Satz 3 des ElektroG sicherzustellen, dass schadstoffhaltige Bauteile und Stoffe bei der Behandlung nicht zerstört werden und Schadstoffe nicht in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden. Nummer 5 des Anlage 4 konkretisiert, dass die umweltgerechte Vorbereitung zur Wiederverwendung und das umweltgerechte Recycling von Bauteilen oder ganzen Geräten nicht behindert werden darf.

### Status Quo

PV-Module werden teilweise bei der Demontage, Entladung und Lagerung beschädigt, sodass die nachfolgende Vorbereitung zur Wiederverwendung bzw. Verwertung gegebenenfalls erheblich beeinträchtigt werden kann und zusätzlich das Risiko von Schadstoffemissionen steigt.

### Mengenpotenzial

2016 lag die Menge der verbauten PV-Module in Deutschland bei 4 Millionen Tonnen. Das durchschnittliche Gewicht eines PV-Moduls beträgt ca. 20 - 25 kg. Der Marktanteil auf kristallinem Silizium basierender Module (c-Si Module) liegt bei ca. 90 % [6]. Die prognostizierte Abfallmenge für PV-Module ist abhängig von deren Nutzungsdauer, Produktionsmenge oder technologiespezifischem Gewicht. Die zu erwartende Lebensdauer eines Solarmoduls beträgt 25 - 30 Jahre. Spätestens ab dem Jahr 2020 ist mit einer mit einem erheblichen Aufkommen an ausgedienten PV-Modulen im Abfallaufkommen zu rechnen. Nach einer Berechnung von Sander et al. ist für das Jahr 2020 [10], auf Basis von statistischen Datengrundlagen nach IRENA (2016), mit einer Menge von rund 8.200 t bis 51.600 t PV-Abfall zu rechnen, je nach verwendetem Formfaktor, siehe Tabelle 22. Eine Prognose nach Beckmann (2012) der PV-Abfallmengen in Deutschland für die Jahre 2025 bis 2050 liefert Tabelle 23 [83].

**Tabelle 22: Abfallpotenzial im Jahr 2020 nach PV-Technologien in Deutschland (Angaben in t) [10]**

PV-Technologien: Gesamtmenge 8.879 t bis 51.578 t	Abfallpotenzial in t
c-Si	7.263 - 40.996
CdTe	544 - 4.043
a-Si	931 - 5.109
CIGS	140 - 1.429

**Tabelle 23: Prognose der PV-Abfallmengen in Deutschland für die Jahre 2025 bis 2050 [83]**

Jahr	Abfallmenge in 1.000 t
2025	14 - 22
2030	152 – 223
2035	1.800 – 2.900
2050	4.900 – 9.600

Die Firma SolarWorld beschreibt das geschätzte Abfallmengenauftreten für PV-Module in Deutschland wie folgt: ab 2015 ist mit einer Menge von etwa 5.540 t/Jahr (Tendenz steigend) zu rechnen. Im Jahr 2022 mit ca. 37.000 t/ Jahr und bis zum Jahr 2030 mit ca. 87.000 t/ Jahr [84].

Wie aus Tabelle 22 hervorgeht, machen c-Si-Module den größten Anteil an der Entsorgung von PV-Modulen aus. Die Anzahl der CdTe-Module in der Entsorgung ist noch gering und wird im Laufe der Jahre deutlich ansteigen.

### Schadstoffmengenpotenzial

Die Hauptschadstoffe in PV-Modulen sind Blei in den Loten von c-Si-Modulen sowie Cadmium und Blei in Dünnschichtmodulen. C-Si-Module weisen einen Pb-Gehalt von 0,7 bis 1 g/kg Modul auf und Dünnschichtmodule von 0,1 bis 1 g/kg. Der CdTe-Gehalt von CdTe-Modulen und CdS-Gehalt von CI(G)S-Dünnschichtmodulen liegt bei 0,7 bis 1,4 g/kg Modul bzw. 0,03 g/kg [9] nach Aussagen von Experten während des 2. AG 3-Treffens. CI(G)S-Module können bis zu 0,02 g/kg Modul Selen enthalten [9]. Amorphe Siliziummodule sind frei von diesen Schadstoffen [85].

Weitere Schadstoffe, die in PV-Modulen enthalten sein können, sind Beryllium, Antimon und Fluor. Diese Schadstoffe sind allerdings in so geringen Mengen enthalten bzw. werden im Prozess der Verwertung der Module und Fraktionen separiert, sodass kein Emissionsrisiko besteht und somit keine Anforderungen an die Entfrachtung dieser Schadstoffe gestellt werden. Beryllium findet Verwendung als Kupfer-Beryllium-Legierung (CuBe-Legierung) mit einem Beryllium-Gehalt von 0,15 bis 2 % zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Kupfer [10]. Antimon kann in einigen Glassorten von PV-Modulen in einer Konzentration zwischen 100 und 300 ppm enthalten sein [10].

### Ökologische Aspekte/Motivation

Behandlungsanforderung 25 dient der Vermeidung von Modulbruch und -vermischung sowie Staubemissionen, einschließlich diffuser Emissionen, bei Anlieferung, Lagerung, Handhabung und Behandlung von PV-Modulen und deren Fraktionen. Gebrochene oder beschädigte PV-Module und Modulbruch erschweren das Handling, die Sortierbarkeit nach Modultechnologie und die Getrennthaltung der Modultypen, für welche verschiedene Recyclingverfahren

existieren und notwendig sind. Zudem wird die Vorbereitung zur Wiederverwendung bzw. das Recycling durch die teilweise etablierte Demontage einzelner Bauteile des PV-Moduls (Al-Rahmen, externe elektrische Leitungen, Junction Box) erschwert bzw. behindert.

PV-Module enthalten unter anderem Schadstoffe wie Blei und Cadmium. Bei unbeschädigten Modulen besteht keine Gefahr der Emission von Schadstoffen. Ein Projekt des Fraunhofer IPV untersucht derzeit die Schadstofffreisetzung aus Photovoltaik-Modulen, wie auf dem 2. Treffen zur AG 3 berichtet wurde. Demnach besteht bei der unsachgemäßen Entsorgung und Lagerung beschädigter Module die Gefahr einer Freisetzung dieser Schadstoffe durch Eindringen von wässrigen Lösungen, wodurch eine Auslaugung der Schadstoffe möglich ist. Dies kann potenziell zu einem Eintrag dieser Schadstoffe in die Umwelt führen. Bei den derzeit vor allem in die Entsorgung gelangenden c-Si-Modulen ist die potenzielle Schadstoff-Elutionsfracht gering. Nach Aussagen des Fraunhofer IPV kann es bei CdTe-Modulen bei dem Aufbrechen des Verbundmaterials aus Glas-Folie-Halbleiterschicht potenziell zu einer Elution von Cd und Te kommen [144].

Beschädigte Module bzw. Glasbruch von PV-Modulen bergen eine erhöhte Verletzungsgefahr für die Mitarbeiter der EBA durch Scherben. Dementsprechend tragen die Anforderungen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz bei.

Der Verzicht auf die Vorverdichtung ist eine Voraussetzung für die Erfüllung des Ziels einer hochwertigen Verwertung, zur Sicherstellung der beschriebenen ökologischen Aspekte und zur Vermeidung der Verletzungsgefahr.

### **Ökonomische Aspekte**

Eine bruchssichere Lagerung auch für den Transport und die Entladung kann am besten durch eine dementsprechend qualifizierte Annahme oder Demontage der Module (Dach, Großanlage) erfolgen. Im Falle der geeigneten Bereitstellung zum Transport (also nach Erfassung mit geringem Bruchrisiko entsprechend den bestehenden rechtlichen Anforderungen) entsteht der EBA für die Umsetzung dieser Empfehlung zur Behandlungsanforderung praktisch kein Zusatzaufwand. Im Falle der schonenden Entladung aus einem Großcontainer und/oder der Umlagerung von Modulen ist der Aufwand für den Erstbehandler hoch.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Auf eine bruchssichere Demontage der PV-Module, einen bruchssicheren Umgang mit und die bruchssichere Lagerungen von PV-Modulen, sowie die Unterlassung des Vorbrechens oder der Verdichtung der PV-Module, ist bereits bei dem Beauftragten zur Demontage der Module zu achten sowie bei der Sammelstelle für PV-Module.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-1 beschreibt in Abschnitt 5.1, dass EAG mit der erforderlichen Sorgfalt behandelt und gelagert werden müssen zur Vermeidung von Schadstoffemissionen als Folge von Beschädigungen/ Bruch. Bei Photovoltaikmodulen muss dies auch erfolgen um Verletzungen durch Glasscherben zu vermeiden. CENELEC EN 50625-2-4 beschreibt in Abschnitt 5.1, dass bei der Handhabung und Lagerung der Module u. a. besondere Aufmerksamkeit darauf zu richten ist, Verletzungen durch Glasscherben zu verhindern.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Gemäß § 4 Abs. 2 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung ist bei der Lagerung und Transport von EAG sowie deren Bauteilen sicherzustellen, dass Beschädigungen, die ein Entweichen von gefährlichen Stoffen nach sich ziehen können, zu vermeiden sind. Gemäß

§ 4 Absatz 8 ist ein Vorbrechen oder Verdichten von PV-Modulen für die Sammlung, Lagerung und Transport nicht zulässig.

### **Position AG und AK**

Die AG und der AK haben der Anforderung zugestimmt.

**Behandlungsanforderung 26:** Die Gefahr eines Kurzschlusses in PV-Modulen zur Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zur Verwertung ist auszuschließen

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel bis Hoch

### **Bestehender Rechtsrahmen**

Nach ElektroG besteht keine ausdrückliche rechtliche Vorgabe, die den Ausschluss der Kurzschlussgefahr in PV-Modulen vorschreibt.

### **Status Quo**

Die Lagerung der PV-Module erfolgt im schlechtesten Falle so, dass eine Stromerzeugung durch einstrahlendes Licht stattfindet, sich externe elektrische Leitungen berühren oder eindringende Nässe einen Kurzschluss auslöst.

### **Mengenpotenzial**

Zur Kurzschlussgefahr in PV-Modulen können keine quantitativen Aussagen getroffen werden.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Durch einen Stromschlag aufgrund erzeugter elektrischer Spannungen können Verletzungen der Mitarbeiter einer EBA auftreten, auch wenn die entstehenden Spannungen so klein sind, dass elektrische Körperströme im Normalfall ohne Folgen bleiben [84]. Die Anforderung trägt u. a. zur Erhöhung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes in der EBA bei und zur Stärkung der Vorbereitung zur Wiederverwendung. Eine einfache Abdeckung oder eine Lagerung in Hallen minimiert das Kurzschlussrisiko. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass externe elektrische Leitungen nicht in Kontakt miteinander kommen.

### **Ökonomische Aspekte**

Der Ausschluss der Kurzschlussgefahr ist ökonomisch nicht zu bewerten.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-1 und EN 50625-2-4 beschreiben in Abschnitt 5.1, dass bei der Handhabung und Lagerung der Module ein Stromschlag durch Kontakt mit gefährlichen Spannungen die erzeugt werden, möglich ist, wenn die PV-Module Licht ausgesetzt werden.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Gemäß § 4 Absatz 8 der österreichischen Abfallbehandlungspflichtenverordnung sind zur Sammlung, Lagerung und Transport der PV-Module geschlossene, lichtdichte, isolierende Behälter u. a. zum Schutz vor Kurzschluss zu verwenden.

## Position AG und AK

Die AG und der AK haben der Anforderung zugestimmt. Durch den Ausschluss der Kurzschlussgefahr sind die licht- und nässegeschützte Lagerung mit eingeschlossen.

### **Behandlungsanforderung 27:** Witterungsgeschützte Lagerung von beschädigten Photovoltaikmodulen, Modulbruchstücken und schadstoffhaltigen Fraktionen der PV-Module

#### **Adressat:**

EBA

#### **Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

#### **Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

#### **Ökologischer Aspekt:**

Hoch

## Bestehender Rechtsrahmen

Gemäß § 20 Absatz 2 Satz 4 ElektroG müssen Standorte für die Lagerung und Behandlung von Altgeräten mindestens die technischen Anforderungen nach Anlage 5 erfüllen. Anlage 5 Nr. 1b und 2b konkretisieren, dass Standorte und Einrichtungen für die Lagerung (einschließlich Zwischenlagerung) und Behandlung von EAG geeignete Bereiche mit wetterbeständiger Abdeckung bzw. undurchlässiger Oberfläche und wasserundurchlässiger Abdeckung haben müssen.

## Status Quo

Eine witterungsgeschützte Lagerung von beschädigten Photovoltaikmodulen, Modulbruchstücken und von schadstoffhaltigen Fraktionen ist nicht immer gegeben.

## Mengenpotenzial

Siehe Abschnitt der Behandlungsanforderung 25.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Es gelten die gleichen ökologischen Aspekte wie zu der Behandlungsanforderung 25.

Ziel der Anforderung ist die Vermeidung von unkontrollierten Schadstoffemissionen und deren potenziellen Eintrag in die Umwelt. Bei einer nicht witterungsgeschützten Lagerung beschädigter Module besteht das Risiko einer Schadstofffreisetzung. Von unbeschädigten Modulen geht keine Emissionsgefahr aus. Potenziell können über Defekte (z. B. Risse im Modul) wässrige Lösungen eindringen, welche zur Auslaugung der darin befindlichen Schadstoffe führen können. Dies kann einen potenziellen Eintrag von Blei oder Cadmium in die Umwelt bewirken. Bei Fraktionen, die aufgrund ihrer Schadstoffgehalte als gefährlicher Abfall einzustufen sind, ist eine witterungsgeschützte Lagerung in jedem Fall verpflichtend.

## Ökonomische Aspekte

Eine witterungsgeschützte Lagerung kann z. B. in abgedeckten Behältern oder Hallen erfolgen. Der Aufwand ist als gering einzuschätzen, da diese Anforderung oft bereits Teil der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung ist und Anlagen zur Behandlung von EAG die technischen Anforderungen nach Anlage 5 ElektroG erfüllen müssen.

## CENELEC

CENELEC EN 50625-1 fordert in Abschnitt 4.2 eine wetterbeständige Abdeckung für Bereiche, in denen EAG sowie deren Fraktionen gelagert und/oder behandelt werden, die eine Schadstofffreisetzung verursachen können, die gefährlich für die Umwelt ist.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Die österreichische Abfallbehandlungspflichtenverordnung regelt in § 4 und § 5 jeweils Absatz 1 u. a., dass EAG in geeigneten Bereichen mit wetterbeständiger Abdeckung zu lagern sind und sicherzustellen ist, dass eine Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt verhindert wird. Gemäß F.1.5 der technischen Vorschrift zur Entsorgung von EAG von SENS/Swico Recycling der Schweiz sind u. a. ganze Geräte und Bestandteile von Geräten, bei welchen durch Witterungseinflüsse Schadstoffe in die Umwelt gelangen können, grundsätzlich witterungsgeschützt zu lagern.

## Position AG und AK

Die AG und der AK haben der Anforderung zugestimmt. In der AG wurde angemerkt, die Anforderung sei bereits von der Genehmigungsbehörde vorgegeben.

### Behandlungsanforderung 28: Klarstellung: Keine Vermischung und Behandlung der PV-Module mit Bauabfällen

#### Klarstellung:

Die Anforderung gemäß § 10 ElektroG zur Getrennterfassung soll zur Klarstellung nochmals betont werden.

#### Adressat:

Besitzer bzw. Verantwortlicher für die Demontage

#### Monitoring:

Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

#### Ökonomischer Aufwand für Behandler:

Gering

#### Ökologischer Aspekt:

Hoch

## Bestehender Rechtsrahmen

§ 9 Absatz 1 KrWG verpflichtet, Abfälle getrennt zu halten und zu behandeln, soweit dies zur Erfüllung der Anforderungen nach § 7 Absatz 2 bis 4 KrWG und § 8 Absatz 1 KrWG erforderlich ist. Nach § 7 Absatz 2 sind Erzeuger und Besitzer von Abfällen zur Verwertung dieser Abfälle verpflichtet, sofern die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Mensch und Umwelt nicht besser gewährleistet. § 7 Absatz 3 KrWG regelt u. a., dass es durch die Verwertung zu keiner Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf kommen darf. Nach Absatz 4 des § 7 ist die Pflicht zur Verwertung von Abfällen u. a. nur dann zu erfüllen, wenn die mit der „Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären“. § 8 Absatz 1 KrWG führt die Rangfolge und Hochwertigkeit der

Verwertungsmaßnahmen ein. Da PV-Module gefährliche Stoffe, wie Blei oder Cadmium enthalten bzw. enthalten können, gilt nach § 2 Absatz 3 ElektroG i.V.m. § 9 Absatz 2 KrWG in Verbindung mit der AVV das Vermischungsverbot für gefährliche Abfälle mit anderen Abfällen.

Gemäß § 2 Absatz 1 Nr. 4 ElektroG fallen PV-Module unter den Anwendungsbereich des ElektroG. Sie dürfen daher nicht mit Bauabfällen gemischt und zusammen behandelt werden. Das ElektroG fordert in § 10 Absatz 1, dass Besitzer von Altgeräten diese „einer vom unsortierten Siedlungsabfall getrennten Erfassung zuzuführen“ haben. Neben der Getrennthaltungspflicht von § 10 Absatz 1 ElektroG ergeben sich auch aus § 10 Absatz 2 ElektroG<sup>7</sup> Anforderungen an eine effektive Getrennthaltung.

Die Gewerbeabfallverordnung GewAbfV<sup>8</sup> stellt Anforderungen in Bezug auf die Bewirtschaftung von bestimmten Bauabfällen. Sie gilt unter anderem für Erzeuger und Besitzer der in der Verordnung bestimmten Bauabfälle. § 8 Absatz 1 GewAbfV zählt Fraktionen auf, die getrennt von Bau- und Abbruchabfällen gehalten werden müssen. Dabei werden PV-Module nicht aufgeführt. Es werden aber Glas und Metalle aufgeführt, jedoch mit Bezug auf Abfallschlüssel der 17er-Gruppe, da dies das Kapitel in der AVV für Bau- und Abbruchabfälle ist.

### **Status Quo**

Eine Vermischung mit Bauabfällen erfolgt teilweise beim Abriss von Gebäude mit installierten PV-Modulen oder in der weiteren Entsorgungskette.

### **Mengenpotenzial**

Das geschätzte Mengenpotenzial zum Abfallaufkommen von PV-Modulen ist im Abschnitt der Behandlungsanforderung 25 beschrieben. Zu den Mengen der als gemischter Bauabfall entsorgter PV-Module liegen keine Daten vor.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Die Vermischung von Dünnschichtmodulen oder kristallinen PV-Modulen mit anderem Abfall muss bereits bei der Demontage der Module, beim Abtransport oder spätestens an der Sammelstelle zwingend verhindert werden, um auszuschließen, dass hochgiftiges Cadmium oder andere Schadstoffe in die Abfallbehandlung mit unbedenklichen Abfallströmen gelangen. Es besteht die Gefahr einer Schadstoffverschleppung in schadstofffreie Abfallströme. Das Weiteren können beim Schreddern von Dünnschichtmodulen cadmiumhaltige Stäube freigesetzt werden und in die Umwelt emittieren, was zu einer unkontrollierten Verteilung der Schadstoffe führen kann [84]. Zudem beeinträchtigt die Entsorgung und Behandlung von PV-Modulen zusammen mit gemischten Bauabfällen die Ressourcenschonung und weitere Ziele der Kreislaufwirtschaft, da wertvolle Materialien und Stoffe eventuell verloren gehen und einer hochwertigen Verwertung nicht zur Verfügung stehen. Ebenfalls birgt diese Art der Entsorgung ausgedienter PV-Module eine erhöhte Bruchgefahr, wodurch weitere ökologische Aspekte, wie unter Anforderung 25 und 26 beschrieben, zum Tragen kommen. Die Vermeidung der Vermischung mit Bauabfällen ist Voraussetzung der Erfüllung der meisten hier beschriebenen Behandlungsanforderungen sowie aller Verwertungsziele und zukünftiger Rückgewinnungsziele von denen in PV-Modulen für eine hochwertige Verwertung geeigneten Stoffen und Materialien.

---

<sup>7</sup>„Die Erfassung nach Absatz 1 hat so zu erfolgen, dass die spätere Vorbereitung zur Wiederverwendung, die Demontage und das Recycling nicht behindert werden“. (§ 10, Abs. 2 ElektroG).

<sup>8</sup>„Gewerbeabfallverordnung vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 896), die durch Artikel 2, Absatz 3 des Gesetzes vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234) geändert worden ist“.

## Ökonomische Aspekte

Ein geordneter Rückbau der Gebäude ist Gegenstand anderer Rechtsbereiche. Die Getrennterfassung von EAG, hier Photovoltaikanlagen, ist seit 2016 durch das ElektroG geregelt und erfordert keinen neuen Zusatzaufwand.

### CENELEC

CENELEC EN 50625-1 beschreibt in Abschnitt 5.7, dass EAG und ihre Fraktionen, die gefährliche Stoffe, gefährliche Gemische oder gefährliche Bauteile enthalten, getrennt von anderen Abfällen behandelt werden müssen. Ebenso dürfen diese nicht mit anderen gefährlichen Abfällen vermischt werden.

### Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Gemäß C.2.5 der technischen Vorschrift zur Entsorgung von EAG von SENS/Swico Recycling der Schweiz dürfen EAG nicht zusammen mit Metallschrott oder anderen Abfällen maschinell verarbeitet werden. Zudem dürfen nach Abschnitt C.3.3 nicht vollständig schadstoffentfrachtete Geräte zur weiteren Verarbeitung mit anderen Abfällen vermischt werden.

In Österreich fallen PV-Module unter den Anwendungsbereich der Abfallbehandlungspflichtenverordnung. Die Sammlung, Lagerung, Transport und Behandlung haben nach den Anforderungen des 2. Abschnitts dieser Verordnung zu erfolgen.

### Position AG und AK

Diese Behandlungsanforderung ist nach dem AG-Treffen neu hinzugekommen. Im AK wurde der Anforderung zugestimmt, unter Anmerkung, dass die Anforderung bereits in der GewAbfV geregelt sei.

**Behandlungsanforderung 29:** Erfassung von Staub am Entstehungspunkt bei Prozessen mit Staubeentwicklung oder Schadstofffreisetzungsfahr bei der Behandlung von PV-Modulen

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Überprüfung über die Anlagengenehmigung bzw. Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Eine konkrete Vorgabe zur Erfassung des Staubes bei Prozessen mit Staubeentwicklung oder Schadstofffreisetzungsfahr besteht seitens des ElektroG nicht. Die TRGS 900 beschreibt einen AGW von  $1,25 \text{ mg/m}^3$  Raumluft für Staub. Die Richtlinie 98/24/EG schreibt einen verbindlichen EU-Arbeitsplatzgrenzwert von  $0,15 \text{ mg/m}^3$  Raumluft für Blei und anorganische Bleiverbindungen vor. Die TRGS 505 schreibt einen Konzentrationswert von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  Raumluft für Blei vor, bei dessen Überschreitung zusätzliche Maßnahmen erforderlich sind.

### Status Quo

PV-Module werden zurzeit größtenteils mechanisch aufgeschlossen. Der dabei entstehende Staub kann schadstoffhaltig sein. Die Erfassung des Staubes am Entstehungspunkt erfolgt nicht

in jedem Fall. Zur Staubminimierung werden die Module beim Prozess des mechanischen Zerkleinerns teilweise mit Wasser befeuchtet.

### **Mengenpotenzial**

Das in PV-Modulen enthaltene Schadstoffmengenpotenzial ist im Abschnitt der Behandlungsanforderung 25 beschrieben. Daten zu den Mengen an freigesetzten Staub während des Behandlungsprozesses sind nicht bekannt.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Bei der mechanischen Zerkleinerung von PV-Modulen können bleihaltiger Glasstaub oder cadmiumhaltige Stäube freigesetzt werden [84]. Aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bestehen Arbeitsplatzgrenzwerte für Staub, Blei und bleihaltige Verbindungen in der Raumluft (siehe bestehender Rechtsrahmen). In hohen Dosen ist CdTe gesundheitsgefährdend, wenn es in den menschlichen Körper eindringt. Eine Gesundheitsgefährdung von diesen PV-Modulen geht dann aus, wenn zerkleinerte Partikel des Moduls verschluckt oder Staubpartikel aus dem Modul eingeatmet werden. Eine Freisetzung von aufnahmefähigen Partikeln findet statt, wenn das Modul zerkleinert und gemahlen wird [86]. Verschiedene etablierte Behandlungsverfahren für PV-Module beinhalten in ihrer Prozesskette eine mechanische Zerkleinerung des Moduls. Zudem können durch eine Stauberfassung am Entstehungspunkt die Schadstoffverteilung und diffuse Emissionen im weiteren Behandlungsprozess reduziert bzw. vermieden werden.

### **Ökonomische Aspekte**

Soweit eine Stauberfassung bisher nicht installiert ist, muss zusätzliche Anlagentechnik installiert werden. Hierfür entstehen Zusatzaufwendungen durch den Umbau der Anlage sowie durch Betriebskosten für Strom und Filterwechsel und Entsorgungskosten für den ggf. als gefährlicher Abfall eingestuft Filterstaub. Da die Anlagen und somit die Stauberfassungstechniken individuell sehr unterschiedlich sind, ist eine allgemeine Quantifizierung nicht möglich [10].

Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass bei vielen Anlagen bereits Stauberfassungstechniken installiert sind. Eine Datengrundlage zum Umfang von Installation solcher Techniken bei den Anlagen in Deutschland liegt nicht vor. Wird als Maßstab der Beurteilung die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bzw. Arbeitsplatzgrenzwerten herangezogen, werden insgesamt gemittelt auf alle Anlagen in Deutschland geringe Aufwendungen erwartet.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-4 / TS 50625-3-5 treffen keine Vorgaben.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Vorschriften zur Erfassung des Staubes aus der Behandlung von PV-Modulen in anderen Staaten.

### **Position AG und AK**

Der Behandlungsanforderung zur Erfassung des Staubes am Entstehungspunkt wurde zugestimmt.

**Behandlungsanforderung 30:** Getrennte Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten PV-Modulen. Verfahren für die gemeinsame Behandlung sind zulässig, insofern bei einer Vermischung siliziumbasierter und nicht-siliziumbasierter Module die Grenzwerte für Glas und andere Fraktionen zur Verwertung von 10 mg Pb/kg, 1 mg Se/kg, 1 mg Cd/kg eingehalten werden.

Photovoltaikmodule aus Tandem- bzw. Mehrfach-Solarzellen sind als nicht-siliziumbasierte Module einzustufen.

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; Ergänzende Prüfung von Betriebstagebüchern und Dokumenten zu den chemischen Analysen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**Behandlungsanforderung 31:** Maximale Schadstoffgehalte für Glas und andere Fraktionen zur Verwertung:

siliziumbasierte Module: Pb-Gehalt: 100 mg/kg, Cd- und Se-Gehalt: 1 mg/kg

nicht-siliziumbasierte Module: Pb- und Se-Gehalt: 10 mg/kg, Cd-Gehalt: 1 mg/kg

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen; Ergänzende Prüfung von Betriebstagebüchern und Dokumenten zu den chemischen Analysen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 32:** Schadstoffhaltige Fraktionen aus PV-Modulen dürfen nicht mit schadstofffreien Fraktionen aus PV-Modulen vermischt oder verdünnt werden, damit keine Verringerung der Schadstoffkonzentration erzielt werden kann.

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen und die ergänzende Prüfung von Betriebstagebüchern; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**CENELEC:**

1:1 Übernahm aus EN 50625-2-4

### Bestehender Rechtsrahmen

Es bestehen im ElektroG keine rechtlichen Vorgaben für die Behandlungsanforderung 30, 31 und 32.

Gemäß § 9 KrWG ist die Vermischung, einschließlich der Verdünnung, gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien unzulässig. Eine Vermischung ist ausnahmsweise dann zulässig, wenn sie in einer nach dem KrWG oder nach dem BImSchG hierfür zugelassenen Anlage erfolgt, die Anforderungen an eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach § 7 Absatz 3 KrWG eingehalten und schädliche Auswirkungen der Abfallbewirtschaftung auf Mensch und Umwelt durch die Vermischung nicht verstärkt werden sowie das Vermischungsverfahren dem Stand der Technik entspricht.

### Status Quo

Derzeit bestehen keine schadstoffbezogenen operationalisierten Vorgaben für die Behandlung von PV-Modultypen. In Deutschland werden für kristalline Siliziummodule und Dünnschichtmodule getrennte, je nach Modultechnologie unterschiedliche, Behandlungsverfahren angewendet. Eine gemeinsame Behandlung von PV-Modulen beider Typen steckt in der Entwicklung. In der Regel kommen Modultechnologien beim Rückbau von Großanlagen oder von Dachinstallationen je nach Modultechnologie getrennt in die Entsorgung, da eine Durchmischung von PV-Technologien (z. B. c-Si- und CdTe-Module) in einer Installation unüblich ist. Mischungen von Modultechnologien können vor allem bei der Abgabe von Modulen an Sammelstellen entstehen oder bei Anlieferungen von Installationsfirmen.

### Mengenpotenzial

Der Marktanteil von kristallinen Siliziummodulen beträgt 90 %. CdTe und CI(G)S-Module haben einen Gesamtmarktanteil von 10 %. Eine ausführliche Darstellung des Mengenpotenzials von PV-Modulen und des Schadstoffmengenpotenzials ist im Abschnitt der Behandlungsanforderung 25 dargestellt.

### Ökologische Aspekte/Motivation

Blei und Cadmium sind hochtoxische Schwermetalle mit einem LD50 Wert von 25 mg/kg bzw. < 25 mg/kg. Durch die getrennte Behandlung der PV-Module nach Modultechnologie werden verschiedene schadstoffhaltige Stoffströme voneinander separiert. Ohne eine Trennung kommt

es zu Querkontaminationen unbelasteter Fraktionen (z. B. Cd-Kontaminationen von Restfraktionen aus der c-Si-Modulaufbereitung). Zudem kann es zu einer Schadstoffverschleppung in Prozesse kommen, aus denen diese nicht ausgeschleust werden (können). Gegebenenfalls können sich die Kreuzkontaminationen von Fraktionen auch auf die Rückgewinnung ressourcenrelevanter Stoffe (In, Ga, Si) auswirken. Unter Einhaltung der empfohlenen Schadstoffgrenzwerte ist eine gemeinsame Behandlung verschiedener Modultechnologien möglich, wodurch technologische Entwicklungen und Innovationen nicht behindert werden.

Grenzwerte für Schadstoffkonzentrationen für Fraktionen aus der Behandlung von PV-Modulen sind die Grundvoraussetzung für eine Vermeidung der Schadstoffverschleppung/ Schadstoffverteilung und für eine hochwertige, umweltverträgliche Verwertung der Outputfraktionen. Sie sind ein wichtiges Instrument zum Schutz der Umweltmedien und tragen zur Ressourcenschonung bei.

### **Ökonomische Aspekte**

Da die PV-Module in der Regel getrennt nach Modultypen beim Erstbehandler ankommen, ist der Sortier- und Behandlungsaufwand als gering einzuschätzen. Die Trennung nach Modultechnologie von gemischten Lieferungen ist mit hohem Aufwand verbunden, da eine automatische bzw. mechanische Trennung nach Modultechnologien nicht etabliert ist. Nach Berechnungen von Sander et al. [10] beträgt der Zeitaufwand zum Separieren von 1 t Altmodule 14 bis 28 min. Nach mündlicher Auskunft einer EBA ergeben sich Arbeitskosten von 35 €/h ca. 8 bis 16 €/t separierter Altmodule. Die Trennung von gemischten Anlieferungen ist daher mit hohem Aufwand verbunden.

Zudem sollte eine Getrenntbehandlung von PV-Modulen verschiedener Technologien nicht vorgeschrieben werden, da sonst mögliche Zukunftstechnologien zur gemeinsamen Behandlung von PV-Modulen verhindert werden.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-4 empfiehlt in Abschnitt 5.5 bei allen Behandlungsverfahren eine Abtrennung von Blei und gefährlichen Stoffen aus der Halbleiterschicht einschließlich der Kontakte vorzusehen. Die CENELEC TS 50625-3-5 beschreibt in Abschnitt 12.2 Grenzwerte für Cadmium, Selen und Blei in Glasfraktionen aus der Behandlung von PV-Modulen. Für Si-basierte Module gilt maximal 1 mg/kg für Cadmium und Selen sowie 100 mg/kg für Blei. Für nicht-Si-basierte Module gelten maximal 10 mg/kg für Cadmium und Selen sowie 100 mg/kg für Blei.

CENELEC EN 50625-1 und 50625-2-4 fordern ein Vermischungs- und Verdünnungsverbot von schadstoffhaltigen Fraktionen/ Stoffen/ Bauteilen mit anderen Fraktionen oder Materialien zur Verringerung der Schadstoffkonzentration.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die österreichische Abfallbehandlungspflichtenverordnung regelt in § 14 die getrennte Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten PV-Modulen. Dabei sind Kombinationszellen als nicht-siliziumbasierte Module einzustufen.

### **Position AG und AK**

Der getrennten Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten PV-Modulen wurde in der AG zugestimmt. Verfahren für eine gemeinsame Behandlung der verschiedenen Modultypen wurden unter bestimmten Voraussetzungen als zulässig diskutiert. Die Getrenntbehandlung solle nicht vorgeschrieben werden, da sonst mögliche Technologien zur gemeinsamen Behandlung von PV-Modulen ausgeschlossen werden würden. Der Einstufung von

Tandem- bzw. Mehrfach-Solarzellen wurde zugestimmt. Die Entfrachtungsziele der CENELEC TS 50625-3-5 fixieren den Behandlungserfolg der gemeinsamen Behandlung, wenn die jeweils strengeren Grenzwerte eingehalten werden. Die empfohlenen maximalen Schadstoffgehalte werden derzeit von den Behandlern unterschritten. Der AK hat den Anforderungen zugestimmt.

### **Behandlungsanforderung 33: Vorrangige Verwertung von Glas aus PV-Modulen als Flachglas oder Behälterglas**

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortlicher der Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung der Anlagegenehmigung in Verbindung mit Vor-Ort-Kontrollen; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### **Bestehender Rechtsrahmen**

Es besteht keine konkrete rechtliche Vorgabe zur Verwertung von Glas aus PV-Modulen.

### **Status Quo**

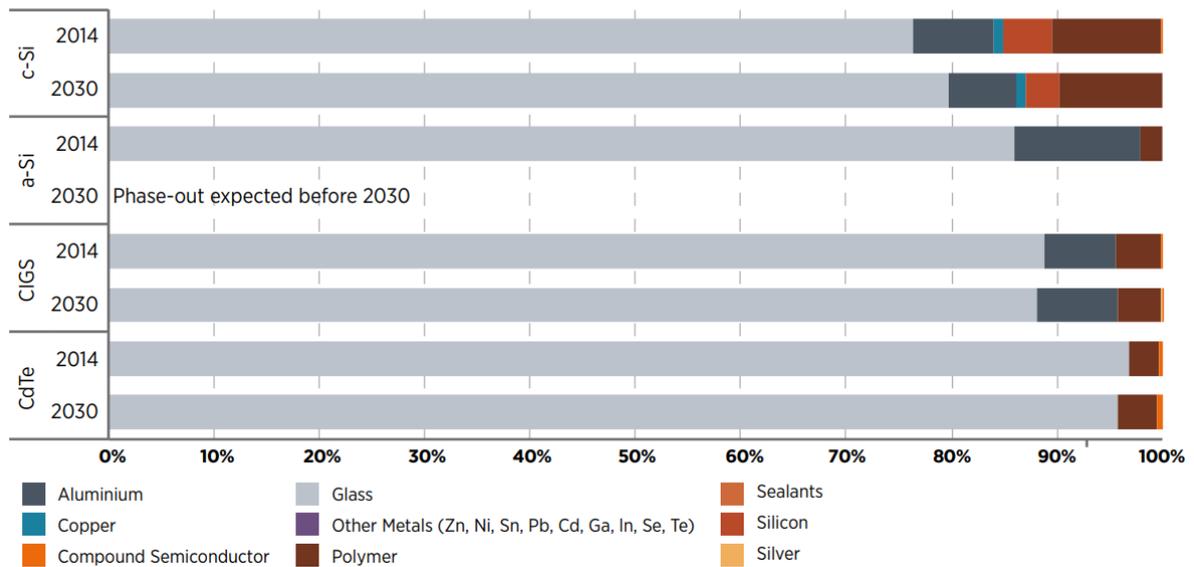
Der etablierte Behandlungsweg für kristalline Siliziummodule durch mechanischen Aufschluss durch Schreddern, ist mit einer starken Verunreinigung der Glasfraktion verbunden. Diese beinhaltet noch Folienanhaftungen, NE-Metallrückstände und Halbleiterbestandteile. Die gewonnene Glasfraktion wird als Isoliermaterial oder Schaumglas verwertet. Derzeit wird in einem laufenden Forschungsprojekt des Verbundvorhabens „EoL-Cycle - End-of-Life Cycle von PV-Modulen“ unter Beteiligung der Reiling Glas Recycling GmbH und des Fraunhofer CSP unter anderem die weitere Aufreinigung der Glasfraktion untersucht [145]. Die Behandlung von Dünnschichtmodulen in thermischen Prozessen oder Prozessen mit tensidhaltigen Flüssigkeiten zum Auflösen des Glas-EVA-Folienverbunds sind teils Stand der Technik, bzw. bereits im Pilotmaßstab erprobt. Der Glasoutput einer US-amerikanischen Firma (3. Technologie-Generation) wird direkt in der Behälterglasindustrie eingesetzt. Ziel ist es, dies auch in Deutschland einzuführen. In Japan existiert ein Forschungsprojekt für das Recycling gemischter Module. Das Glas ist so schadstoffarm, dass es in der Behälterglasherstellung genutzt werden kann.

### **Mengenpotenzial**

Der Anteil Glas je Modul unterscheidet sich je nach PV-Technologie und Alter der Module (siehe Abbildung 17).

**Abbildung 17: Zusammensetzung von PV-Modulen [87]**

**Figure 10** Evolution to 2030 of materials used for different PV panel technologies as a percentage of total panel mass



PV-Module bestehen je nach Modultechnologie zu 76 bis 96 % aus Glas. Den höchsten Glasanteil weisen CdTe-Module auf. C-Si Module besitzen den geringsten Glasanteil.

Berechnungen zufolge besteht ein kristallines Siliziummodul (bei einem durchschnittlichen Modulgewicht von 20 - 25 kg) zu 15 - 18 kg (76 %) aus Glas. Bei aktuell 4 Millionen Tonnen installierter PV-Module in Deutschland ist dementsprechend von einer verbauten Gesamtglasmenge von mindestens 3 Millionen t auszugehen nach Aussagen auf dem 2. AG 3-Treffen.

Eine eigene Berechnung des Potenzials von Glasabfall aus PV-Modulen für das Jahr 2020, auf Grundlage des Abfallpotenzials verschiedener Modultechnologien nach Tabelle 22 und der Modulzusammensetzung aus Abbildung 17, ist in Tabelle 24 aufgeführt. Als Berechnungsgrundlage dient der Glasanteil von 2014.

**Tabelle 24: Glasabfall in Deutschland je nach Modultechnologie für das Jahr 2020**

PV-Technologien: Gesamtmenge 8.879 t bis 51.578 t	Abfallpotenzial in t	Glasabfall in t
c-Si	7.263 – 40.996	5.519 – 31.157
CdTe	544 – 4.043	522 – 3.881
a-Si	931 – 5.109	801 – 4.394
CIGS	140 – 1.429	123 – 1.258

### Ökologische Aspekte/Motivation

Die Verwertung von Glas aus PV-Modulen trägt zu einem wichtigen Teil zur positiven Umweltbilanz der PV-Modulverwertung bei. Eine Studie des Fraunhofer IBP kam zu dem Ergebnis, dass durch das Recycling von einer Tonne siliziumbasierten PV-Modulen ca. 800 bis 1.200 kg CO<sub>2</sub> eq. eingespart werden können. Insbesondere das Recycling von Aluminium und Glasscherben trägt hierzu signifikant bei [88].

Der Wiedereinsatz von rezykliertem Glas ist in vielen Subsektoren der Glasindustrie Stand der Technik. Es besteht ein hoher Scherbenbedarf in der Industrie. Das Glas aus PV-Modulen kann

bei entsprechen-der Reinheit in verschiedenen Subsektoren der Glasindustrie eingesetzt werden. Die Glasfraktion der c-Si-Module ist für einen Einsatz in der Flachglasproduktion geeignet [9], wie auch Experten des 1. AG 3-Treffens bestätigten. Eine Verwertung als Schaumglas ist ebenfalls möglich, insofern die Glasfraktion so verunreinigt ist, dass eine Nutzung in der Flachglasproduktion nicht möglich ist [89]. Laut Auskunft einiger Akteure aus dem 2. AG-Treffen bedeutet die Verwertung des Glases aus PV-Modulen zu Schaumglas bzw. Glaswolle allerdings ein Downcycling dieser hochwertigen Fraktion.

Ein Einsatz der Glasfraktion aus c-Si-Modulen in der Behälterglasindustrie ist möglich, wenn hierzu die Anforderungen der Behälterglasindustrie eingehalten werden nach Aussagen eines Teilnehmers beim 2. AG 3-Treffen. Demnach darf der Maximalgehalt an NE-Metallen 3 g/t, an Fe-Metallen 2 g/t und an loser Organik 300 g/t in der Glasfraktion nicht überschritten werden [90]. Zudem ist ein Richtwert als Summenparameter für die Schwermetalle Pb, Cd, Cr(VI) und Hg von 200 mg/kg einzuhalten, welcher derzeit von den Akteuren aus der PV-Modulbehandlung deutlich unterschritten wird. Nach Aussagen auf dem AG-Treffen wird derzeit in einem Forschungsvorhaben u. a. die weitere Aufbereitung der Glasfraktion untersucht, um die Anforderungen der Behälter- und Flachglasindustrie zu erfüllen (siehe auch [146]). Der Glasoutput aus CdTe-Modulen eines Herstellers von PV-Modulen in den USA (3. Technologie-Generation) wird laut AG-Treffen direkt in der Behälterglasindustrie eingesetzt. Ziel ist es, dies auch in Deutschland einzuführen. Die Glasfraktion aus Dünnschichtmodulen ist nach Aussagen eines Teilnehmers beim 1. AG 3-Treffen ebenfalls für ein Recycling in der Flachglasindustrie geeignet.

Schlussfolgernd ist eine hochwertige stoffliche Verwertung von Altglas aus PV-Modulen als Flach- oder Behälterglas ökologisch vorteilhaft. Sie wäre möglich, wenn Separationsverfahren- und Glasreinigungsverfahren angewandt werden, die derzeit noch nicht großtechnisch für alle Modultypen, insbesondere c-Si-Module, etabliert sind.

### **Ökonomische Aspekte**

Aus Ressourcenschutzsicht spielt die Qualität der wiedergewonnenen Glasfraktionen eine große Rolle. Derzeit stehen feinste NE-Partikel und Folienanhaftungen einer hochwertigen Verwertung der gewonnenen Glasfraktion entgegen, so dass ein Downcycling des Glases erfolgt und dieses nur für die Herstellung von Isolier-/Akustikdämmung, Glaswolle oder Schaumglas verwendet wird [7]. Ein Versuch, den wiedergewonnen Glasanteil aus siliziumbasierten Modulen für den Einsatz in der Flachglasherstellung verfügbar zu machen, wurde mit positivem Ergebnis durchgeführt. Nach Aussage der Anlagenbetreiber ist dieses Verfahren aktuell insbesondere aufgrund der geringen Mengen an Photovoltaikmodulen nicht wirtschaftlich zu betreiben [9]. Problematisch hinsichtlich des Recyclings sei nicht die Technologie, sondern die zu tätigen langfristigen Investitionen, für welche eine sichere Auslastung der Anlagen von großer Bedeutung sei, sagte ein Teilnehmer beim 1. AG 3-Treffen. Zudem bringt ein Downcycling des Glases niedrigere Verkaufserlöse.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-4 / TS 50625-3-5 treffen keine Vorgaben zur Verwertung des Glases aus PV-Modulen.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Vorschriften zur Verwertung des Glases aus PV-Modulen in anderen Staaten.

## Position AG und AK

Der derzeit etablierte Verwertungsweg des PV-Glases zu Schaumglas ist ein Downcycling des Flachglases, wodurch der Rohstoff für eine längerfristige Kreislaufführung verloren geht. Noch behindern Verunreinigungen der Glasfraktion den Einsatz in der Flachglas- und Behälterglasindustrie. Das Projekt End of Life Cycle von PV-Modulen könnte ca. im Jahr 2025 implementierbar sein.

### Behandlungsanforderung 34: Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung über die Anlagengenehmigungen und Betriebstagebücher; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

### Bestehender Rechtsrahmen

Es besteht keine rechtliche Vorgabe zur Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen. Jedoch hat gemäß § 20 Absatz 2 Satz 1 ElektroG die Erstbehandlung und weitere Behandlungstätigkeiten nach dem Stand der Technik im Sinne des § 3 Absatz 28 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu erfolgen.

### Status Quo

Die Rückgewinnung von Cadmium und Tellur aus CdTe-Modulen ist durch den führenden Hersteller dieser Module großtechnisch etabliert und Stand der Technik. Für Module anderer Hersteller ist dies nicht der Fall. Siliziumbasierte PV-Module beinhalten diese Elemente nicht.

### Mengenpotenzial

Nach Kernbaum und Hübner enthält eine Tonne CdTe-Module zwischen 0,7 und 1,4 kg Cadmiumtellurid [91]. Eine Berechnung des Abfallpotenzials für CdTe auf Grundlage des Abfallpotenzials im Jahr 2020 für CdTe-Module (vgl. Tabelle 22) ist in Tabelle 25 dargestellt.

**Tabelle 25: Abfallpotenzial in kg für CdTe im Jahr 2020**

CdTe-Module Abfallpotenzial in t in 2020	Abfallpotenzial in kg bei 0,7 kg CdTe	Abfallpotenzial in kg bei 1,4 kg CdTe
544 (min.)	380	762
4.043 (max.)	2830	5660

### Ökologische Aspekte/Motivation

Cadmium und Tellur gelten als hochtoxische bzw. toxische Elemente mit einem LD50-Wert von < 25 mg/kg bzw. 83 mg/kg nach Expertenaussagen beim 2. AG 3-Treffen. Aufgrund der Toxizität beider Elemente erscheint eine Kreislaufführung als sinnvoll. Marwede (2013) allerdings wertet verschiedene Studien zur Gefährlichkeit von Cadmiumtellurid. Demnach bewerten einige Studien CdTe als krebserregend und stellen es als Risiko für die Umwelt dar, insgesamt ist CdTe

als Verbindung jedoch weniger gefährlich als elementares Cd. Ökologische Langzeituntersuchungen lagen noch nicht vor [92].

Für CdTe-Module vom führenden Hersteller dieser Module gibt es ein eigene Rücknahmelösung, welche durch einen auf diesen Modultyp ausgerichteten Behandlungsprozess ergänzt wird. Die Behandlungsprozesse anderer Akteure verwerten ggf. nur Glas und Aluminium und beseitigen die Restfraktionen. Dadurch gehen Wertstoffe und Schwermetalle wie bspw. Cadmium für eine Kreislaufführung verloren. Durch die Beseitigung besteht potenziell die Möglichkeit der Schadstoffverschleppung und-verteiung in der Umwelt, durch Auslaugungsprozesse aus den Modulen auf der Deponie. Eine unkontrollierte Verbreitung von Te und Cd in Verbindung mit der Deponierung von CdTe-Modulen wird allerdings als gering angesehen [92].

Bei Tellur handelt sich es um einen Stoff mit einem hohen GWP-Wert von 21,9 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg. Der GWP-Wert von Cadmium beträgt 3,0 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg [34].

### **Ökonomische Aspekte**

Durch die Anwendung von Behandlungsverfahren zur Rückgewinnung von Cd und Te aus CdTe-Modulen entsteht ein höherer Aufwand gegenüber Verfahren, bei denen die mengenmäßig größte Fraktion des CdTe-Moduls Glas zur Verwertung abgetrennt wird und die Restfraktionen beseitigt werden. Letztgenannte Verfahren sind jedoch großtechnisch nicht etabliert, sondern es erfolgt ggf. eine Beseitigung des gesamten Moduls [10]. Eine Verwertungskette, die auch die Verwertung des CdTe einschließt, ist für Deutschland für Module des größten Herstellers etabliert. Die Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen ist somit Stand der Technik. Das zurückgewonnene Halbleitermaterial, insbesondere Tellurid, kann und wird in neuen Panels verbaut [7]. Bei einer engen Auslegung kann entsprechend den Anforderungen gemäß § 20 Abs. 2 ElektroG davon ausgegangen werden, dass kein Zusatzaufwand im Vergleich zur Erfüllung des rechtlichen Rahmens entsteht. Zudem führt eine Beseitigung von gefährlichen Abfällen zu einer Erhöhung der Entsorgungskosten.

### **CENELEC**

In CENELEC EN 50625-2-4 / TS 50625-3-5 wird die Rückgewinnung dieser Metalle nicht thematisiert.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Vorschriften zur Rückgewinnung dieser Stoffe in anderen Staaten.

### **Position AG und AK**

Der Rückgewinnung von Cadmium und Tellur aus PV-Modulen wurde zugestimmt. Es wurde von Akteuren angemerkt, dass eine Übergangsfrist zu beachten sei. Das UBA sieht dies nicht als notwendig an.

### Behandlungsanforderung 35: Werkstoffliche Verwertung von Aluminium aus der Behandlung der PV-Module

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung über Betriebstagebücher; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

#### Bestehender Rechtsrahmen

Es besteht keine konkrete rechtliche Vorgabe zur werkstofflichen Verwertung von Aluminium aus der PV-Modulbehandlung.

#### Status Quo

Der ggf. vorhandene Aluminiumrahmen von PV-Modulen wird bei industriell etablierten Verfahren teils nicht werkstofflich verwertet (z. B. nur rohstofflich als Desoxidationsmittel in der Stahlindustrie). Die werkstoffliche Verwertung von Aluminiumrahmen aus PV-Modulen ist großtechnisch möglich und etabliert. Bei den derzeit etablierten Behandlungsverfahren wird Al als reine Fraktion entweder durch die Demontage des Al-Rahmens vor der mechanischen Zerkleinerung oder während des Behandlungsprozesses generiert.

#### Mengenpotenzial

Nach Abbildung 17 aus dem IRENA Report zu PV-Modulen besteht ein Photovoltaikmodul je nach Technologie zu 7 bis 12 % aus Aluminium [87]. Andere Quellen geben Aluminiumgehalte von 10 – 12 % an [9]. Den höchsten Aluminiumanteil besitzen a-Si-Module und CI(G)S-Module mit bis ca. 12 %. Der Al-Anteil von c-Si-Modulen liegt bei 7 bis 10 %. Nach Sander et al. beinhaltet eine Tonne kristalliner Photovoltaikmodule ca. 103 kg Aluminium [93]. Eine Berechnung des Abfallpotenzials für Aluminium aus c-Si-Modulen auf Grundlage des Abfallpotenzials im Jahr 2020 (vgl. Tabelle 22) ist in Tabelle 26 dargestellt.

**Tabelle 26: Abfallpotenzial in t für Al im Jahr 2020**

c-Si-Module Abfallpotenzial in t in 2020	Abfallpotenzial Al in t bei 103 kg Al/t
7.263 (min)	748
40.996 (max)	4.223

Nach Daten des Fraunhofer CSP aus dem Projekt EoL-Cycle von PV-Modulen, die beim AG-Treffen vorgestellt wurden, besteht ein kristallines Siliziummodul bei einem durchschnittlichen Modulgewicht von 20 - 25 kg zu 2 - 2,5 kg aus Aluminium (ca. 10 % des Moduls). Bei einer Gesamtmenge von 3,6 Millionen Tonnen installierter c-Si-Module in Deutschland ergibt sich dementsprechend ein Abfallpotenzial für Aluminium von 360.000 t.

#### Ökologische Aspekte/Motivation

Eine Studie des Fraunhofer IBP kam zu dem Ergebnis, dass durch das Recycling von einer Tonne siliziumbasierten PV-Modulen ca. 800 bis 1.200 kg CO<sub>2</sub> eq. eingespart werden können. Insbesondere das Recycling von Aluminium und Glasscherben trägt hierzu signifikant bei [88].

Aluminium wird bei den derzeit etablierten Behandlungsverfahren für PV-Module als reine Fraktion zurückgewonnen. Das Aluminiumrecycling benötigt erheblich weniger Energie als die Primärgewinnung Aluminium aus Erz. Die durch das Aluminiumrecycling eingesparte Energie beträgt ca. 95 %, gegenüber der Gewinnung von Primäraluminium [94]. Durch das werkstoffliche Recycling von Aluminium wird die Primärproduktion eines Produktes vermieden, das einen hohen GWP-Wert von 8,2 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg aufweist [34]. Weitere allgemeine ökologische Vorteile, die für ein hochwertiges Al Recyclings sprechen, sind in Abbildung 18 dargestellt.

### **Ökonomische Aspekte**

Die Demontage des Aluminiumrahmens vor der mechanischen Zerkleinerung ist Stand der Technik. In anderen etablierten Verfahren wird das Aluminium nach der mechanischen Zerkleinerung des Moduls zurückgewonnen. Das zeigt ein zusätzlicher Umsetzungsaufwand zur Rückgewinnung des Aluminiums ist sehr gering bzw. nicht vorhanden. Aluminium aus dem Behandlungsprozess aus PV-Modulen liegt als Knetlegierung vor und ist deshalb für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung geeignet. Die nachfolgende Verwertung des Aluminiums bringt den Recyclern die höchsten Erlöse aus dem PV-Recycling.

### **CENELEC**

CENELEC EN 50625-2-4 / TS 50625-3-5 treffen keine Vorgaben zur Verwertung des Al aus PV-Modulen.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Vorschriften zur werkstofflichen Verwertung von Aluminium in anderen Staaten.

### **Position AG und AK**

Der ursprünglichen Anforderung Demontage/Separation von außenliegenden metallhaltigen Bauteilen (Al-Rahmen) vor der mechanischen Zerkleinerung der Module wurde nicht zugestimmt. Zu der obenstehenden neu ausgestalteten Formulierung der Anforderung wurde in der AK-Sitzung aufgrund fehlender Akteure keine Rückmeldung gegeben. Im ersten Treffen der Arbeitsgruppe merkten die anwesenden Akteure aus dem PV-Recycling an, dass über Behandlungsanforderungen ein hochwertiges Recycling angestrebt werden soll und gleichzeitig kein Technologieausschluss stattfinden darf, bzw. bestimmte Recyclingwege nicht komplett ausgeschlossen werden dürfen.

### **Spezifische Begründungen**

Im AG-Treffen wurde aufgezeigt, dass die Demontage/Separation von außenliegenden metallhaltigen Bauteilen (Al-Rahmen) vor der mechanischen Zerkleinerung der Module einen Technologieausschluss bedeutet, da ein Recyclingverfahren etabliert ist, in dem dies nicht geschieht und diese Vorgehensweise bei zukünftig steigenden Mengen schwer einzuhalten sein könnte. Die Anforderung wurde deshalb neu ausgestaltet zur werkstofflichen Verwertung von Aluminium aus der Behandlung der PV-Module, um eine minderwertige Verwertung des hochwertigen Al zum Beispiel als Desoxidationsmittel in der Stahlindustrie auszuschließen.

**Behandlungsanforderung 36:** 2030: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von In und Ga aus PV-Modulen;

3 Jahre nach Inkrafttreten der BehandV: Überprüfung der Anforderung

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung über die Anlagengenehmigungen und Betriebstagebücher; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 37:** 2025: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von Ag und Si aus PV-Modulen;

3 Jahre nach Inkrafttreten der BehandV: Überprüfung der Anforderung

**Adressat:**

FBA, EBA als Verantwortliche der Gestaltung der Entsorgungskette

**Monitoring:**

Überprüfung über die Anlagengenehmigungen und Betriebstagebücher; die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen oder die Aufsichtsbehörde/Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel bis Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel bis Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Es besteht keine rechtliche Vorgabe zur Rückgewinnung von In, Ga, Ag und Si aus PV-Modulen.

### Status Quo

Eine Rückgewinnung von Indium und Gallium setzt die Separation und Aufkonzentrierung der Zielsubstanzen voraus. Die derzeit etablierten Behandlungsprozesse sind nicht auf die Rückgewinnung ausgerichtet. Auch die Rückgewinnung von Silizium und Silber findet derzeit nicht statt. Einige Anlagen bzw. Behandlungsverfahren sind bereits technisch dazu geeignet In, Ga, Ag und Si zurückzugewinnen [7]. Zurzeit laufen Forschungsvorhaben zur Rückgewinnung von Si und Ag [146], jedoch gibt es ein Entwicklungsrisiko. Die Rückgewinnung von Ag oder Si ist noch nicht wirtschaftlich.

### Mengenpotenzial

Die Rückgewinnungsquote strategischer Rohstoffe in derzeit etablierten Behandlungs- und Verwertungswegen liegt bei 0 %. Für die verschiedenen Ansätze im Labor- bzw. Pilotmaßstab zur Rückgewinnung von Indium und Gallium aus CIGS-Zellen lassen sich die Rückgewinnungsraten auf 70 bis 90 % beziffern [92]. Die Rückgewinnungsquote von Si aus c-Si-Modulen kann mit > 75 % abgeschätzt werden [10, 93].

Indium und Gallium sind in CI(G)S-Dünnschichtmodulen enthalten. Nach Wolf et al. beträgt der Indiumgehalt 0,01 - 0,02 g/kg Modul und der Galliumgehalt bei 0,01 g/kg Modul [9]. Eine Berechnung des Abfallpotenzials für Indium und Gallium aus CI(G)S-Modulen auf Grundlage des Abfallpotenzials im Jahr 2020 (vgl. Tabelle 22Tabelle 21) ist in Tabelle 27 dargestellt.

**Tabelle 27: Abfallpotenzial in kg für In und Ga im Jahr 2020**

CI(G)S-Module Abfallpotenzial in t in 2020	Abfallpotenzial In bei 0,015 g In/kg	Abfallpotenzial Ga bei 0,01 g Ga/kg
140 (min)	2,1	1,4
1.429 (max)	21,4	14,3

Nach Daten aus dem Forschungsprojekt EoL-Cycle von PV-Modulen besteht ein kristallines Siliziummodul bei einem durchschnittlichen Modulgewicht von 20 - 25 kg zu 0,5 - 1 kg aus Silizium (2-4 % des Moduls). Bei einer Gesamtmenge von 4 Millionen Tonnen installierter c-Si-Module in Deutschland ergibt sich dementsprechend ein Abfallpotenzial für Silizium von 100.000 - 200.000 t nach Aussage des Projektteilnehmers beim AG-Treffen. Nach Sander et al. beträgt der Masseanteil Silizium je Tonne Altmodule ca. 30 kg [93].

Silber kommt beinahe ausschließlich in c-Si-Modulen vor. Nach auf dem AG-Treffen vorgestellten Daten enthalten ältere Module bis zu 20 g Silber. Im Forschungsprojekt EoL-Cycle von PV-Modulen wurden bei einem durchschnittlichen Modulgewicht von 20 - 25 kg mit einem Silbergehalt von 10 - 20 g (0,05 - 0,1 % des Moduls) und einer Gesamtmenge von 4 Millionen Tonnen installierter c-Si-Module in Deutschland ein Abfallpotenzial für Silber von 2.000 - 4.000 t errechnet. Nach Sander et al. beträgt der Masseanteil Silber je Tonne Altmodule 0,004 - 0,006 kg [93].

Eine Berechnung des Abfallpotenzials für Silizium und Silber aus c-Si-Modulen auf Grundlage des Abfallpotenzials im Jahr 2020 (vgl. Tabelle 22Tabelle 21) ist in Tabelle 28 dargestellt.

**Tabelle 28: Abfallpotenzial in t bzw. kg für Si und Ag im Jahr 2020**

c-Si-Module Abfallpotenzial in t in 2020	Abfallpotenzial Si in t bei 30 kg Si/t	Abfallpotenzial Ag in kg bei 0,005 kg Ag/t
7.263 (min)	217,9	36,3
40.996 (max)	1229,9	205

### Ökologische Aspekte/Motivation

Durch die Rückgewinnung der benannten Stoffe können Primärproduktionen von Stoffen mit sehr hohen GWP-Werten vermieden werden. Die GWP-Werte liegen bei 102 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg für In, 205 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg für Ga und 196 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg für Ag [34].

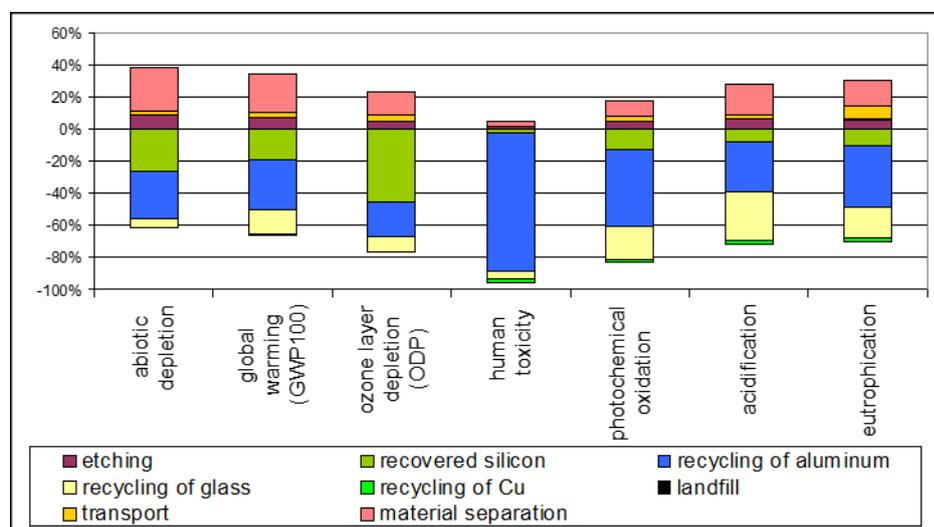
Die Primärproduktion von Indium weist eine vergleichsweise gute Umweltbilanz auf, was wesentlich in der Tatsache begründet liegt, dass Indium als Nebenprodukt der Zinkgewinnung anfällt. Die positiven Auswirkungen auf die Umwelt bei Verringerung des primären In-Bedarfs durch das Recycling sind daher gering [81]. Es besteht jedoch eine Intensivierung des Zinkrecyclings. Sollte sich dieses weiter durchsetzen, so muss auch das Recycling von In weiterentwickelt werden [23].

Hauptsächlich wird Gallium als Nebenprodukt bei der Aluminiumoxidgewinnung gewonnen. Die Herstellung von Aluminiumoxid erfordert den Abbau von Bauxit, was mit einer Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle) verbunden ist.

Bei der Gewinnung von Galliumarsenid für die Halbleiterproduktion können potenzielle Luftbelastungen durch im Prozess eingesetzten Arsenwasserstoff und Phosphorwasserstoff entstehen. Ebenfalls besteht potenziell die Gefahr einer Emission von Gallium- und Arsenstaub und -dampf. Eine schlechte Informationslage hinsichtlich der Herstellungsverfahren von Gallium und seinen Produkten gestattet es kaum, quantitative Aussagen zur Verringerung der Umweltbelastung bei der Herstellung von Gallium zu machen [81].

Die Siliziumrückgewinnung entlastet die Umwelt in besonderem Maße, da der stark umweltbelastende Abbau und die Aufbereitung vermieden werden. Die Herstellung von Silizium ist sehr energieintensiv [7]. Abbildung 18 zeigt den ökologischen Vorteil der Siliziumrückgewinnung aus Photovoltaikmodulen [93]. Daraus geht hervor, dass die Si Rückgewinnung unter anderem stark zur Verringerung des Treibhauspotenzials sowie zur Verringerung des Abbaus der Ozonschicht und des abiotischen Abbaus bspw. nicht erneuerbarer Rohstoffe oder fossiler Brennstoffe beiträgt.

**Abbildung 18: Ökobilanz für das hochwertige Recycling von Siliziummodulen [93]**



Die relevanten Umweltbelastungen des Stoffhaushalts von Silber treten bei der Gewinnung und der Primärproduktion auf. Daneben können infolge der eingesetzten Verfahren und Hilfsstoffe bei der Gewinnung und Aufbereitung erhebliche Umweltbelastungen auftreten [81].

### Ökonomische Aspekte

Indium, Gallium und Silicium stehen auf der Liste der EU-Kommission zu Critical Raw Materials [16]. Das heißt, für diese Stoffe besteht eine hohe wirtschaftliche Relevanz bei gleichzeitig unsicherer Versorgungssicherheit. Durch die Rückgewinnung dieser Stoffe aus PV-Modulen kann zur Versorgungssicherheit beigetragen werden. Aufgrund des hohen prognostizierten Abfallpotenzials der PV-Module besteht eine hohe Ressourcenrelevanz für In, Ga, Si und Ag. Gerade für In und Ga besteht eine starke Nachfrage in der Elektronikindustrie. Ein zusätzlicher Bedarf an Gallium entsteht durch den Einsatz von Galliumarsenid als Halbleiter in integrierten Schaltungen, insbesondere von Mobiltelefonen. Gallium ist im Gegensatz zu Silizium nur begrenzt verfügbar [81].

Eine Neuausrichtung der Behandlungsverfahren zur Rückgewinnung der genannten Stoffe wäre mit erhöhtem Kostenaufwand im Vergleich zur Nicht-Rückgewinnung verbunden.

Reuter et al. nennen eine globale Gallium-Produktionsmenge von 152 t für das Jahr 2006 [31]. USGS nennt als globale Produktionsmenge für low-grade Gallium 315 t für 2017 [95]. Für

Indium nennen Reuter et al. eine globale Produktionsmenge für 2006 von 581 t [31], USGS für das Jahr 2017 von 720 t und für 2016 von 680 t [82]. Eine Rückgewinnung dieser Stoffe wird angesichts der dargestellten Mengenverhältnisse vor allem dann sinnvoll sein, wenn eine Zusammenführung von Stoffströmen aus anderen Quellen realisiert werden kann (siehe auch [36]).

Ähnliches könnte auch für Silizium gelten. Bei einem globalen Gesamtverbrauch von Si im Jahr 2017 von ca. 7,4 Millionen Tonnen [96] macht die potenzielle Menge aus dem Recycling von c-Si-Modulen in Deutschland einen sehr geringen Anteil aus. Zusätzlich ist hier aber zu beachten, dass keine anderen mengenrelevanten Quellen eines vergleichbaren Si-Materials für die Zusammenführung von Recyclingströmen zur Verfügung stehen.

In einer ersten Pilotanlage zum Recycling von PV-Modulen in Deutschland konnte nachgewiesen werden, dass eine Rückgewinnung von intakten und zerbrochenen Si-Wafern möglich ist. Unter anderem verursachte der niedrige Durchsatz bei diesem Verfahren relativ hohe Kosten und führte zu dessen Einstellung. Eine Rückgewinnung des kristallinen Siliziums ist, wie oben erwähnt technisch möglich, wird derzeit allerdings nicht praktiziert, da bei den aktuell geringen Altmodulmengen und niedrigen Siliziumpreisen eine solche Technik bislang noch nicht wirtschaftlich darstellbar war [7].

Für die derzeit anfallenden geringen Mengen an Gallium und Indium stehen keine großtechnischen Rückgewinnungsverfahren zur Verfügung. Um die Entwicklung und Implementierung solcher Verfahren zu fördern kann eine politische Willensbekundung in Form einer zukünftigen Rückgewinnungsanforderung gestellt werden. Dabei ist der Zeitpunkt für die Fristsetzung zum einen deswegen unklar, weil die economy of scale-Effekte nicht bekannt sind. Zum anderen aber auch, weil unklar ist welcher Anteil von „alten“ Modulen in die weitere Nutzung gehen. Angesichts der geringen Mengen, die für das Jahr 2020 berechnet wurden, erscheint eine Durchsetzung schwierig und eine mittelfristige Perspektive sinnvoll zu sein.

#### **CENELEC**

In CENELEC EN 50625-2-4 / TS 50625-3-5 wird die Rückgewinnung dieser Metalle nicht thematisiert.

#### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Vorschriften zur Rückgewinnung dieser Metalle in anderen Staaten.

#### **Position AG und AK**

Der zukünftigen Rückgewinnung von Gallium und Indium aus PV-Modulen wurde zugestimmt.

Aus dem 2. Treffen der AG 3 ging hervor, dass die Anforderung 39 in einem Zeitraum von 2 Jahren realisierbar sei und auch ein politisches Interesse daran besteht. Die Si-Rückgewinnung rechnet sich noch nicht, allerdings kann sie über das Ag-Recycling aus PV-Modulen finanziert werden. Nach dem AG-Treffen wurde die Anforderung um Ag ergänzt. In der 3. AK-Sitzung wurde dem zugestimmt.

## 4.4 AG 4 – Kunststoffe

Die Steigerung der werkstofflichen Verwertung der Kunststoffe und die Ausschleusung der Kunststoffe mit polybromierten Flammschutzmitteln führen zur Schadstoffentfrachtung und zur Stärkung der Ressourcenschonung.

### 4.4.1 Steigerung der werkstofflichen Verwertung der Kunststoffe

**Behandlungsanforderung 38:** Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Umfang von mindestens 10 Gew.-% der Inputmasse Kategorie 1 Wärmeüberträger

Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Umfang von mindestens 10 Gew.-% der Inputmasse Kategorie 4 Großgeräte (ohne Photovoltaikmodule) und Steigerung um weitere 2,5 Gew.-% nach 5 Jahren

Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Umfang von mindestens 10 Gew.-% der Inputmasse der Summe von Kategorie 5 Kleingeräte (ohne Photovoltaikmodule) und Kategorie 6 Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte und Steigerung um weitere 5 Gew.-% nach 5 Jahren

Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Umfang von mindestens 5 Gew.-% der Inputmasse Flachbildschirmgeräte und Steigerung um weitere 5 Gew.-% nach 5 Jahren

**Adressat:**

EBA (verantwortlich für den Verbleibsweg der Kunststoffe und für den Nachweis der Quoten)

**Monitoring:**

Die Inputmasse der jeweiligen Kategorien ist in den Betriebstagebüchern bereits jetzt erfasst. Die notwendigen Informationsflüsse für die Bestimmung der Verwertungs- bzw. Recyclingmenge von den FBA zu den EBA ist ebenfalls bestehende Rechtslage. Die Recyclingquoten können bei der Jahresstatistikmeldung mit angegeben werden (siehe Kapitel 4.7.3). Die Daten der Flachbildschirmgeräte müssen separat erfragt werden, da derzeit eine gemeinsame Erfassung mit den CRT-Geräten erfolgt.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Bisher sind Kunststoffe nur ein undifferenzierter Bestandteil der Verwertungsquoten des § 22 Absatz 1 ElektroG je Kategorie. Eine kunststoffspezifische Verwertungs- bzw. Recyclingquote für EAG besteht nicht.

### Status Quo

In der AG wurde als Stand der Technik festgestellt, dass meist nach einer Vorsortierung ganzer Geräte eine Grobzerkleinerung mittels Einwellenzerkleinerer, Prallmühle, Schredder, Querstromzerspanner oder Smasher stattfindet. Anschließend erfolgen meist eine manuelle Erstsartierung, danach eine Mittelzerkleinerung mittels Granulator, Hammerbrecher oder Schredder und die folgende mechanische und sensorische Sortierung. Die Feinzerkleinerung erfolgt mittels Hammermühle oder Schneidmühle. Teilweise wird eine weitere mechanische und sensorische Sortierung durchgeführt. In der Praxis gehen Mischfraktionen zum Folgebehandler bzw. es werden Monofraktionen von ABS, PC, PS, PMMA, PE und PP erzeugt.

Die Demontage einzelner Kunststoffteile vor einer Zerkleinerung findet hauptsächlich bei Bildschirm- und Monitorgehäusen statt. In anderen Sammelgruppen werden die Geräte meist mechanisch zerkleinert und anschließend durch Sortieraggregate nach metallhaltig und nicht-metallhaltig fraktioniert. Entstehende Kunststofffraktionen werden bei einem Folgebehandler/Kunststoffaufbereiter weiterbehandelt. Stand der Technik ist die Dichtentrennung über Schwimm-Sink-Trennung.

Eine Festlegung von Recyclingquoten für Kunststoffe bedeutet, dass insbesondere Großschredderbetreiber ihren Behandlungsablauf für Großgeräte anpassen müssen oder die Aufbereitung der Schredderleichtfraktion qualifizieren müssen. Dieses steht im Einklang mit der notwendigen Verbesserung des Standes der Technik für die Aufbereitung von Altfahrzeugen, da auch hier Quotenrelevanz durch steigende Kunststoffanteile besteht.

## **Mengenpotenzial**

### **Gesamtpotenzial**

Die Consultic-Studie aus dem Jahr 2016 gibt einen Post-Consumer Kunststoffabfall in EAG von 280.000 t für das Jahr 2015 an. Davon sollen 34.000 t werkstofflich (12 %), 243.000 t energetisch verwertet und 3.000 t in die Beseitigung gegangen sein [97].

Die Berichterstattung an die EU für das Jahr 2013 bezüglich Sammel- und Verwertungsquoten von EAG gibt an, dass 727.998 t EAG gesammelt wurden und davon 602.894 t in das Recycling gingen. Wird ein Kunststoffanteil zwischen 16-20 Gew.-% im Mittel für EAG angenommen (16 Gew.-% in [98], 18 Gew.-% in [99] und 20 Gew.-% in [100]), ergibt sich mindestens ein theoretisches Potenzial von 120.000 t gesammelter Kunststofffraktion aus EAG. Es ist zu bedenken, dass der Kunststoffanteil in EAG kontinuierlich ansteigt: im Jahr 1980 war ein Kunststoffanteil von 14 Gew.-% angegeben worden, im Jahr 1992 18 Gew.-%, im Jahr 2005 23 Gew.-% und im Jahr 2008 dann 20,6 Gew.-% [101], sodass künftig sukzessiv ein deutlich höheres Kunststoffpotenzial als 120.000 t zu erwarten ist.

Der Forschungsnehmer im UFOPLAN-Vorhaben errechnete ein Potenzial an Kunststoffen von im Jahr 2013 gesammelten EAG anhand von [9, 102] in einer Größenordnung von 180.000 t. Nach Abzug der Kunststoffe mit verwendungsbeschränkten bromierten Flammenschutzmitteln gemäß der FSM-Gehalt-Angaben aus [9] ergibt sich ein Kunststoffpotenzial zur werkstofflichen Verwertung von ca. 120.000 t.

Die Auswertung der Daten für 2015 [103] ergab, dass Kategorie 1 Haushaltsgroßgeräte heute einen Anteil von 40,1 % an der Sammelmenge hat, Kategorie 2 Haushaltskleingeräte 17,2 %, Kategorie 3 IT- und Telekommunikationsgeräte 17,1 % sowie Kategorie 4 Geräte der Unterhaltungselektronik 17,9 %, sodass diese einen Gesamtanteil von über 92 % umfassen.

**ABS, PS und PP: Eingrenzung auf die massenrelevantesten Kunststoffe**

Als massenrelevanteste Kunststoffe der 10 Kategorien der WEEE-RL sind ABS, PS und PP von Baxter et al. identifiziert worden. Im Mittel machen ABS, PS und PP 78 % aller verwendeten Kunststoffe bei EAG aus [98]. Delgado et al. geben an, dass ABS, PS und PP zusammen 70 % des Kunststoffanteils in EAG ausmachen [104]. Wäger und Kollegen geben für Schweiz im Jahr 2007 an, dass die bedeutendsten Kunststoffsorten ABS, PS und PP sind [77]. Untersuchungen im SV-Gutachten ergaben, dass Kleingeräte hauptsächlich aus ABS, PS und PP bestanden [9]. Daher wird für die Behandlungsanforderungen und die Quotierung auf diese 3 Kunststoffsorten fokussiert.

## Wärmeüberträger

Bei Schüler und Sutter lässt sich ein Kunststoffanteil von 15,3 Gew.-% für Kühlgeräte errechnen [105]. Dehoust und Schüler geben für die Kunststofffraktion (ohne PUR) bei einem 40,9 kg Kühlgerät eine Kunststoffmasse von 6,2 kg an, was 15 Gew.-% entspricht [106]. In Portugal ergaben Analysen einen Kunststoffanteil von 10,4 Gew.-% bei den Altkühlgeräten aus dem Jahr 2009 mit einem Anteil von PS zu 76 %, PP zu 8 % und ABS zu 6 %. Dabei ist zu beachten, dass oftmals bei diesen Kühlgeräten die „Innenausstattung“ fehlte und der Kunststoffanteil höher sein müsste [107]. Wäger et al. geben im Mittel einen Wert von 28 Gew.-% für das Jahr 2008 an [72]. Crowe et al. geben 13 Gew. % im Jahr 2003 an [108]. Die Zusammensetzung gibt Delgado et al. mit u. a. 31 % PS, 26 % ABS und 22 % PU an [104] und auch Wäger et al. führen aus, dass ABS, PS und PUR die vorherrschenden Kunststoffsorten sind [72].

Von Kunststoffaufbereitern wird angegeben, dass die Kunststoffe mit einer Quote von 85 %-90 % stofflich verwertet werden können. Vor dem Hintergrund, dass in den letzten Jahren ein stetiger Anstieg an Kunststoffbestandteilen in Kühlgeräten zu beobachten ist und von den Behandlern ein weiterer Anstieg in den kommenden Jahren erwartet wird, ist eine werkstoffliche Verwertung von 10 Gew.-% der Kunststoffe aus Kühlgeräten (ohne Berücksichtigung von PU) erreichbar.

## Großgeräte

Im Hinblick auf die neuen Kategorien bzw. Sammelgruppen wird sich die Zusammensetzung und damit der Kunststoffanteil im Vergleich zu den jetzigen Sammelgruppen bezüglich zwei Neuerungen verändern: Einerseits greift ab 15.08.2018 der offene Anwendungsbereich (Open Scope), andererseits wird eine Größenunterscheidung eingeführt.

In Österreich gelten gerätegrößenorientierte Sammelgruppen seit 2005. Um eine Vorstellung für eine mögliche Zusammensetzung der Sammelgruppe Großgeräte mit einer Kantenlänge > 50 cm zu bekommen, ist in Tabelle 29 die Zusammensetzung in Österreich aufgeführt [109].

**Tabelle 29: Zusammensetzung Sammelgruppe Großgeräte in Österreich [109]**

Geräteklasse	Anteil an Gesamtgewicht in %
Haushaltsgroßgeräte (exkl. Kühl-, Gefrier- und Klimageräte)	93,85
IT&T-Geräte (exkl. Bildschirmgeräte)	1,80
Beleuchtungskörper	0,01
Elektrische und elektronische Werkzeuge	2,43
Spiel-, Sport- und Freizeitgeräte	0,02
Unterhaltungselektronik (exkl. Bildschirmgeräte)	0,01
„Haushaltskleingeräte“ – groß	1,89

Die ursprünglichen Erhebungen der Daten stammen aus dem Jahr 2006. Für die aktuellen Berechnungen werden immer noch diese Werte in Österreich angenommen. Mit 93,85 % weisen die Haushaltsgroßgeräte (exkl. Kühl-, Gefrier- und Klimageräte) den mit Abstand größten Anteil auf und besitzen somit den größten Einfluss auf die Kunststoffzusammensetzung.

Den Kunststoffanteil der Haushaltsgroßgeräte ohne Kühlgeräte geben Wäger et al. im Mittel mit 19 Gew.-% für das Jahr 2008 an. Vorherrschende Kunststoffsorten sind PP, PUR, ABS und PS

[72]. Der Kunststoffanteil der Kategorie 1 der WEEE-Richtlinie (mit Kühlgeräten) liegt laut Baxter et al. bei ca. 15 Gew.-% [98] und von Delgado et al. bei 22 Gew.-% [104].

Eine werkstoffliche Verwertung der Kunststoffe aus der Gruppe Großgeräte wird begünstigt, da hier besonders wenig polybromierte Flammschutzmittel zu erwarten sind. In der CENELEC EN 50625-1 wird angegeben, dass Kunststofffraktionen aus Haushaltsgroßgeräten als frei von bromierten Flammschutzmitteln gelten und somit dem Recycling zugeführt werden sollen. Auch Wilts et al. weisen darauf hin, dass Haushaltsgroßgeräte in Bezug auf flammgeschützte Kunststoffe den kleinsten gewichtsmäßigen Anteil auf die Gesamtmasse ausmachen [102].

Im Hinblick auf eine veränderte Zusammensetzung der Kategorie Großgeräte wird eine Kunststoffquote von 10 Gew.-% angesetzt, die nach 5 Jahren um weitere 2,5 Gew.-% gesteigert werden soll.

### Kleingeräte und kleine IT- und Telekommunikationsgeräte

Da sich auch hier in der zukünftigen Sammelgruppe die Zusammensetzung der Kunststoffe aufgrund der Größenunterscheidung ändern wird, wird wie bereits für die Großgeräte die Zusammensetzung in Österreich in Tabelle 30 aufgeführt [109].

**Tabelle 30: Zusammensetzung Sammelgruppe Kleingeräte in Österreich [109]**

Geräteklasse	Anteil an Gesamtgewicht in %
Haushaltskleingeräte	26,54
IT&T-Geräte (exkl. Bildschirmgeräte)	38,31
Unterhaltungselektronik (exkl. Bildschirmgeräte)	16,54
Beleuchtungskörper	4,62
Elektrische und elektronische Werkzeuge	6,34
Spiel-, Sport- und Freizeitgeräte	0,28
Medizinische Geräte	0,73
Überwachungs- und Kontrollinstrumente	0,65
„Haushaltsgroßgeräte“ (exkl. Kühl-, Gefrier- und Klimageräte) – klein	5,77

Eine Untersuchung der Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott ergab, dass elektrische und elektronische Kleingeräte, darunter kleine Haushaltsgeräte, Unterhaltungselektronik, Kommunikationstechnik sowie EDV- und Büroelektronik, aus dem Jahr 2011 einen Kunststoffanteil von etwa 30 Gew.-% haben [71]. Wäger et al. geben für Haushaltkleingeräte aus dem Jahr 2008 im Mittel 37 Gew. % (hauptsächlich PP, PS und ABS), für IT- und Telekommunikationsgeräte 42 Gew.-% (hauptsächlich ABS, ABS/PC und PS), für Unterhaltungselektronik 24 Gew.-% (hauptsächlich PS, ABS) sowie für Spielzeuge 73 Gew.-% an [72]. Dimitrakakis et al. geben etwa 25-35 Gew.-% Kunststoffanteil für kleine EAG an, wobei Haushaltkleingeräte der Kategorie 2 und Spielzeuge der Kategorie 7 nach WEEE-Richtlinie den größten Kunststoffanteil mit 41 Gew.-% bzw. 84 Gew.-% besitzen. In Kategorie 2 wurde hauptsächlich ABS und PP gefunden, in Kategorie 7 dagegen ABS und PS und kein PP. PS ist dominant in Informations- und Kommunikationstechnologie [110].

Der hohe Anteil an Gutprodukt (Kunststoffe mit wenig Flammschutzmittelanteil und marktfähigen Kunststoffen ABS, PP und PS) macht die Fraktion aus der Gruppe Kleingeräte für Aufbereiter nach deren Aussage besonders attraktiv.

Im Hinblick auf die ähnlich bleibende Zusammensetzung der Kategorie 5 Kleingeräte und Kategorie 6 kleine IT- und Telekommunikationsgeräte wird eine Kunststoffquote von 10 Gew.-% angesetzt, die nach 5 Jahren um weitere 5 Gew.-% gesteigert werden soll.

### **Flachbildschirmgeräte**

Buekens et al. geben für Fernseher einen Kunststoffanteil von 31 Gew.-% an, wobei PPE/PS einen Anteil von 63 % und PC/ABS von 32 % haben. Für Monitore wird 90 % PC/ABS angegeben [101]. In der Schweiz wurde ein Kunststoffanteil von 35 Gew.-% für LCD-Monitore ermittelt [77]. Fernsehgeräte werden bei Crowe et al. mit 22,9 Gew.-% Kunststoffanteil angegeben [108]. LCD-Monitore bestehen nach Wäger et al. aus über 30 % ABS und etwa 20 % PC sowie PA. Für Fernsehgeräte wird ein HIPS-Anteil von 53-89 % angegeben, gefolgt von ABS mit 2-43 %, je nachdem welche Studie herangezogen wird [72]. In Österreich hatten die PC-Monitore einen Kunststoffanteil von 40,1 % an ABS, 41,5 % PMMA sowie 14,4 % PC/ABS. Die Fernsehgeräte bestanden zu 59,5 % aus ABS, 14,3 % PS, und 5,6 % PMMA [76]. Ergebnisse aus dem SV-Gutachten ergaben, dass Fernsehgeräte zu 26 Gew.-% und Monitore zu 32 Gew.-% aus Kunststoffen bestehen. Bei 6 der 10 Rückwände der Fernseher wurde ABS bestimmt, 2 mit PS und 2 waren aus Kunststoffblends [9]. Die Gerätefüße der Flachbildschirme bestehen aus hochwertigen Kunststoffen, die bei einem LCD-Fernseher etwa 7 Gew.-% ausmachen und bei einem LCD-Monitor 24 Gew.-% [26].

Nach Tesar und Öhlinger sind Flachbildschirmgeräte kaum mit Flammschutzmitteln belastet, da Monitore 1,7 % und Fernsehgeräte 8,6 % Flammschutzmittel-haltige Kunststoffe enthalten [76]. Das SV-Gutachten konnte keine beschränkten polybromierten Flammschutzmittel in Fernherrückwänden nachweisen [9]. Eine detailliertere Ausführung zu den Flammschutzmitteln in Bildschirmgeräten findet sich in Kapitel 4.4.2 unter Mengenpotenzial.

Im Hinblick auf die derzeit noch schlechte Datenverfügbarkeit zu Flammschutzmitteleinsätzen bei Flachbildschirmgeräten wird eine konservative Kunststoffquote der werkstofflichen Verwertung von 5 Gew.-% angesetzt, die nach 5 Jahren um weitere 5 Gew.-% gesteigert werden soll.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Grundsätzlich sind die im ElektroG und in der WEEE-RL angesetzten Recyclingquoten nur erreichbar, wenn auch das Kunststoffrecycling bei der Aufbereitung von EAG fokussiert wird.

Nach Plastics Europe erzeugt die Herstellung von Kunststoffen ein GWP zwischen 1,6 und 6,4 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg Material [78]. Sie haben damit ein höheres spezifisches inhärentes Treibhauspotenzial als z. B. Eisen [34].

Das theoretische Kunststoffpotenzial wird auf 120.000 t geschätzt, wovon nur ca. 18.000 t pro Jahr recycelt wurden [10]. Den spezifischen Treibhauspotenzialen nach Plastics Europe folgend berechnet sich das inhärente Treibhauspotenzial zu ca. 350.000 t CO<sub>2</sub> eq. pro Jahr [10].

Im Vergleich der werkstofflichen mit der energetischen Verwertung ist bei den Kunststoffen von Bedeutung, wie die Energieinhalte der Kunststoffe jeweils genutzt werden können. Eine grobe Annäherung hieran liefert ein Vergleich der Energieaufwände, die für die Herstellung der Kunststoffe notwendig sind, mit dem Heizwert, der angibt, wie viel Energie in Form von Wärme bei der Verbrennung pro Masseinheit des Stoffs gewonnen werden kann. Bei einer werkstofflichen Verwertung werden die „Energieinvestitionen“ aus der Produktion zu großen Anteilen weiter genutzt. Bei einer energetischen Verwertung gehen sie verloren, da dort nur der Heizwert der Kunststoffe genutzt wird. Unter der Annahme, dass der Heizwert im Durchschnitt bei ca. 50 % des Gesamtenergieinhaltes von Kunststoffen aus EAG liegt, ergibt sich ein Energiepotenzial von 5 PJ/a, das verloren geht, wenn die Kunststoffe energetisch statt

werkstofflich genutzt werden. Dies entspricht dem jährlichen Energieverbrauch der Einwohner einer Kleinstadt wie z. B. Meißen in Sachsen bei einem pro Kopf-Energieverbrauch in Deutschland in 2015 von 162 GJ [10].

Wäger et al. führten 2011 die Umwelteinflüsse der schweizerischen Sammlung und Verwertungssysteme für Elektroaltgeräte aus dem Jahr 2009 aus. Demnach ist im Vergleich zum Jahr 2004 die Umweltbelastung um 14 % gesunken, da die Behandlung der Kunststoffe (mehr Recycling, weniger Verbrennung) und die Behandlung der Metallfraktion sich positiv auswirkten. Die Hauptbeiträge zur Umweltbelastung haben im Schweizer Recyclingmodell die Behandlung der Metallfraktion, CRT-Geräte und die Kunststofffraktion. Für die Kunststofffraktion wurde eine fünffach kleinere Umweltbelastung für Sekundärproduktion im Vergleich zur Primärproduktion von Kunststoffen identifiziert [111].

Wäger et al. führten in 2015 die Umweltbelastung der Kunststofffraktion aus WEEE detaillierter aus. Dabei zeigte die Verbrennung der Kunststofffraktion in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage eine höhere Umweltbelastung mit einem Faktor 4 und mehr als das Recycling. Die Frischwassereutrophierung fiel mit einem Faktor 2 geringer aus. Das Ozonabbaupotenzial war beim Recycling um 25 % höher ausgefallen als bei der Verbrennung. Umwelteinflüsse bezüglich Toxizität und Eutrophierung sind relevanter als zum Beispiel das Treibhauspotenzial bei einem Vergleich zwischen Verbrennung und Recycling. In einer zweiten Betrachtungsebene zeigten Primärkunststoffe im Vergleich zu Sekundärkunststoffen um den Faktor 6 bis 10 höhere Umweltbelastungen. Hier ließen sich zusätzlich die nicht-toxischen Indikatoren bewerten. Das Ozonabbaupotenzial zeigt nun einen deutlichen Vorteil und zwar mehr als die Hälfte bei der Produktion von Sekundärkunststoffen im Vergleich zu Primärkunststoffen [112].

### **Ökonomische Aspekte/Aufwand**

Eine Quotenmeldung verursacht nur geringfügig höhere Kosten, da die Daten bereits bei den Erstbehandlungsanlagen generiert werden.

Der Zusatzaufwand, der erfolgen muss, um die empfohlene Quote zu erreichen, kann aufgrund der fehlenden Datengrundlage (Status quo der Anlagen zur Aufbereitung von EAG zur Separation von Kunststoffen, Änderungsbedarfe der Anlagen, Prozesskosten Erstbehandler und Folgebehandler, Änderungsbedarfe Folgebehandler) nicht quantifiziert werden.

Da solche Entsorgungsketten in Deutschland bereits großtechnisch etabliert sind (Aussagen verschiedener Erst- und Folgebehandler z. B. beim Treffen der AG 4 Kunststoffe am 23.03.2017) ist davon auszugehen, dass eine Umsetzung dieser Empfehlung zur Behandlungsanforderung im laufenden Betrieb keinen hohen Zusatzaufwand bedeutet. Gegebenenfalls ergeben sich einmalige Transaktionskosten für die Umstellung der Entsorgungsketten.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Zu klären ist, ab wann die Kunststofffraktion als werkstofflich verwertet angesehen werden kann, etwa nach der Aufbereitung beim Folgebehandler oder erst beim Verwerter (z. B. nach dem Extrudieren zu Pellets). Die Kunststofffraktion kann am Eingang oder am Ausgang (Produkt) der Verwertungsanlage als werkstofflich verwertet berechnet werden. Die inputbezogene Berechnung bei der Verwertungsanlage oder outputbezogene Berechnung bei dem Folgebehandler führt zu deutlich einfacheren Monitoringprozessen, als eine endproduktbezogene Berechnung. Es wird eine Zuführungsquote empfohlen, wie sie bereits für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling bzw. die Verwertung insgesamt im ElektroG angewandt wird. Abschließend soll der Sachverhalt bei einem Folgevorhaben geklärt werden.

## Monitoring

Die Inputmasse der Kategorien ist in den Betriebstagebüchern bereits jetzt erfasst. Die notwendigen Informationsflüsse für die Bestimmung der Verwertungsmenge von den Folgebehandlungsanlagen zu den Erstbehandlungsanlagen ist ebenfalls bestehende Rechtslage. Die kunststoffspezifischen Recyclingquoten können bei der Jahresstatistikmeldung mit angegeben werden. Weitere Ausarbeitungen sind in Kapitel 4.7.1 sowie Kapitel 4.7.3.

Die Daten der Flachbildschirmgeräte müssen separat erfragt werden, da derzeit eine gemeinsame Erfassung mit den CRT-Geräten erfolgt.

## CENELEC

Die CENELEC-Normen der 50625-Serie geben derzeit keine kunststoffspezifischen Quoten vor.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Es gibt keine kunststoffspezifischen Quoten in Vorschriften anderer Staaten.

## Position AG und AK

Grundsätzlich wurde eine positive Rückmeldung bezüglich Recyclingquoten auf die Kunststofffraktion während der Treffen gegenüber dem UBA geäußert. Die Höhe in einigen Kategorien wurde aber als zu ambitioniert eingestuft und wurde daher vom UBA angepasst.

Im Anschluss an die letzte AK-Sitzung gab es eine schriftliche Stellungnahme des „Workshops Erstbehandlung“. Es wurde sich grundsätzlich dahingehend geäußert, dass die Vorgabe von Mindestmengen zur werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen als problematisch anzusehen ist. Sie lehnen sie ab oder sie sollten zumindest unter dem Aspekt, wenn technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar, stehen. Sie geben zu bedenken, dass die Erreichung anspruchsvoller Quoten durch flankierende technische Vorgaben und recyclingtechnische Möglichkeiten erschwert wird. So gilt beispielsweise für die Herstellung von Flachbildschirmen das „Candle flame resistance requirement“ gemäß EN 60065. Demnach müssen diese Geräte vor externen Wärmequellen geschützt werden. Aufgrund der Restriktionen beim Einsatz von bromierten Flammhemmern kämen verstärkt phosphorbasierte Flammhemmer zur Anwendung. Diese würden die stoffliche Verwertung erschweren und wären mit derzeit verfügbaren Dichttrennverfahren nur sehr eingeschränkt zu separieren. Design for Recycling spielt in der Produktentwicklung leider immer noch eine untergeordnete Rolle.

**Behandlungsanforderung 39:** Verpflichtende Separation von losen Glas- und Kunststoffinnenteilen für Stufe-1-Behandlungsanlagen von Kühl- und Tiefkühlgeräten;

vorrangige Separation der losen Glas- und Kunststoffinnenteile vor einem Zerkleinerungsprozess für Stufe-2-Behandlungsanlagen von Kühl- und Tiefkühlgeräten

### Adressat:

EBA

### Monitoring:

Separat entsorgte Fraktionen können über die Betriebstagebücher nachverfolgt werden. Eine Kontrolle vor Ort durch einen Sachverständigen bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde wird empfohlen.

### Ökonomischer Aufwand für Behandler:

Mittel

### Ökologischer Aspekt:

Mittel

## **Bestehender Rechtsrahmen**

Eine explizite Vorgabe zur Separation der losen Glas- und Kunststoffinnenteile aus Kühl- und Tiefkühlgeräten besteht derzeit im ElektroG nicht.

## **Status Quo**

Eine Separation loser Glas- und Kunststoffinnenteile findet nicht immer statt. Nach Aussage verschiedener Erstbehandler werden üblicherweise lose Glasteile vorher separiert, da sie den Aufschluss der Geräte im mechanischen Prozess negativ beeinflussen.

## **Mengenpotenzial**

Die Stiftung ear gibt eine Sammelmenge der Sammelgruppe 2 Kühlgeräte, ölgefüllte Radiatoren von insgesamt 115.024 t im Jahr 2016 auf deren Internetseite an. Kunststoffteile, die manuell mit einfachsten Mitteln entfernbar sind, wie Gemüseschalen, Einlegeböden, Butterdosen, haben einen Anteil von 2 Gew. % [113]. Somit ergibt sich theoretisches Potenzial von 2.300 t pro Jahr an leicht entnehmbaren Kunststoffteilen aus Kühl- und Tiefkühlgeräten, die einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung zugeführt werden könnten.

Glas besitzt einen Anteil von 1 Gew.-% [113], sodass nach dem Stand der Technik ein theoretisches Potenzial von 1.150 t pro Jahr als Glasfraktion ergibt.

## **Ökologische Aspekte**

Bei den separierten Kunststoffteilen handelt es sich in der Regel um Kunststoffteile aus PS [114]. Erstbehandlungsanlagenbetreiber gaben an, dass der PS-Kunststoff hier in besonders hochwertiger Form vorliege, da er lebensmittelecht ohne bromierte Flammschutzmittel sei. PS weist je nach Typ ein inhärentes GWP von 2-3 kg CO<sub>2</sub> eq. pro kg auf [78].

Bei einem Abfallpotenzial von 194.000 Kühlgeräten ([115], die im Jahr 2010 die in Verkehr gebrachte Menge als Abfallpotenzial annahmen) und einem angenommenen Gewicht der werkstofflich verwertbaren Kunststoffinnenteile von 1 kg/Gerät, ergäbe sich eine Kunststoffmenge mit einem inhärenten GWP von knapp 200 t CO<sub>2</sub> eq. pro Jahr. Erfolgt eine energetische Verwertung (z. B. weil die Separation beim Folgebehandler unvollständig ist), so geht ca. die Hälfte des Gesamtenergiegehalts (die Produktionsenergie) verloren. Der Energieverlust durch Verbrennung beläuft sich auf 8.342 GJ pro Jahr [10].

Siehe auch Begründung bei Behandlungsanforderung 38.

## **Ökonomische Aspekte**

Da bereits Glasinnenteile separiert werden, können lose Kunststoffinnenteile im gleichen Schritt mit entnommen werden. Insofern entsteht in diesem Fall nur ein sehr geringerer Aufwand. Allerdings müssen die generierten Kunststofffraktionen separat gelagert und transportiert werden. Dies kann besonders in den Fällen, bei denen Stufe-1-Anlagen nur geringe Mengen Kühlgeräte behandeln, zu Mehraufwand führen.

Mit Stand vom November 2017 berichtete eine Erstbehandlungsanlage, dass die Erlöse aus dem Verkauf von Kunststofffraktionen aus der Erstbehandlung von EAG nicht die Transportkosten zum Folgebehandler decken. Wird für Zeiten mit höheren Erlösen von 100 € Nettoerlös pro t ausgegangen, muss bei Arbeitskosten von 35 €/h (mündliche Auskunft einer Erstbehandlungsanlage im Jahr 2017) für einen rentablen Betrieb in 2,8 Stunden 1 t separiert werden bei entsprechenden 10 Sekunden pro kg. Dies erscheint realistisch, wenn die Separation mit anderen Tätigkeiten durchgeführt wird (z. B. Glasseparation).

## Weiterer Regelungsbedarf

Separat entsorgte Fraktionen können über die Betriebstagebücher nachverfolgt werden. Eine Kontrolle vor Ort wird empfohlen, vor allem bei Stufe-1-Behandlungsanlagen.

### CENELEC

Die CENELEC-Normen geben keine Separationsvorschriften für lose Innenteile aus Kühl- und Tiefkühlgeräten vor.

### Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Es gibt keine Separationspflicht der Innenteile aus Kühl- und Tiefkühlgeräten in Vorschriften anderer Staaten oder in weiteren Richtlinien. Jedoch findet sich in der AbfallBPV von Österreich eine Forderung zur Behandlungsstufe 2 von Kühlgeräten, dass eine gesonderte Ausgangsmenge von sonstigen Kunst- und Verbundstoffen bei der Stoffstrombilanz zu erfassen ist. Darin sind dementsprechend die Kunststoffe der Korpi und die losen Innenteile eines Kühlgerätes zu verstehen. Nachfragen bei einem österreichischen Experten zur Kühlgerätebehandlung ergaben, dass lose Kunststoffinnenteile daher vor einer Zerkleinerung der Geräte in der Regel bei der Kühlgerätebehandlung separiert und als eigene Fraktion erfasst werden, um der Forderung der Aufstellung einer Stoffstrombilanz gerecht werden zu können.

### Position AG und AK

Im Anschluss an die letzte AK-Sitzung gab es in der schriftlichen Stellungnahme des „Workshops Erstbehandlung“ die Mitteilung, dass die manuelle Entfernung von losen Kunststoffteilen aus Kühlgeräten nicht vorgegeben werden soll, da sie in verschiedenen Anlagenkonzepten nicht erforderlich ist, ohne einen Wertstoffverlust zu verursachen.

Infolgedessen wurde bei den Akteuren erneut recherchiert. Im Ergebnis gab es die Rückmeldung, dass es für reine Stufe-1-Behandlungsanlagen denkbar wäre, für Anlagen mit integrierter Stufe-2-Behandlung wurde eine ablehnende Haltung herausgestellt. Da die Formulierung „vorrangig“ eingefügt wurde, ergibt sich bei den Anlagen keine Pflicht zu Separation.

**Behandlungsanforderung 40:** Separation von Holz und Holzverbundstoffen von allen Geräten > 25 cm Kantenlänge

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

### Bestehender Rechtsrahmen

Eine Vorgabe zur Separation von Holz und Holzverbundstoffen besteht im ElektroG nicht.

### Status Quo

Große Holzteile werden bereits von vielen Erstbehandlungsanlagen entnommen. Die Gründe bestehen in der Brandgefahr, der Kontamination nachfolgender Fraktionen wie der Kunststofffraktion sowie eine Erleichterung der nachfolgenden Aufarbeitungsschritte. Die

Geräteentnahme erfolgt manuell, gegebenenfalls mit maschineller Unterstützung aus dem gemischten Inputstrom. Holzgeräte wie alte Lautsprecher werden separat behandelt. Die Holzfraktion wird üblicherweise energetisch verwertet. Nach Öffnung des Anwendungsbereiches des ElektroG sind höhere Holzanteile im Input der Erstbehandlungsanlagen denkbar.

### **Mengenpotenzial**

Eine ausreichend qualifizierte Datengrundlage zu den Mengen von holzhaltigen Geräten > 25 cm Kantenlänge im Input von Erstbehandlungsanlagen liegt nicht vor.

### **Ökologische Aspekte**

Die Recyclingfähigkeit von Styrol- und Polyolefin-haltigen Kunststofffraktionen würde bedeutend von einer Reduktion von Gummi, Holz und PU-Schaum profitieren. Stenvall et al. zeigen auf, dass die generierte Kunststofffraktion nach der Aufbereitung inklusive einer Dichteabtrennung der mit bromhaltigen Flammschutzmitteln belasteten Kunststoffe dann ein geringes Niveau an Verunreinigungen erreiche. Lediglich 1-2 Gew.-% waren keine Thermoplaste bei der aufbereiteten Fraktion. Der Hauptstörstoff war dabei Holz. [116].

Damit wird durch die Separation des Holzes die werkstoffliche Verwertung des Kunststoffs unterstützt. Wird das Holz nicht separiert, erfolgt am Ende für die holzbelastete Fraktion eine energetische Verwertung.

### **Ökonomische Aspekte**

Da in jedem Fall ein Sortierschritt beim Erstbehandler erfolgt, folgt aus der Separation von Holz beim Erstbehandler nur ein geringer Zusatzaufwand. Eine ausreichend qualifizierte Datengrundlage zu den Mengen von holzhaltigen Geräten > 25 cm Kantenlängen im Input von EBA als Grundlage eine Quantifizierung der ökonomischen Abschätzung liegt nicht vor.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Separationsvorschriften für Holz und Holzverbundstoffe vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Separationspflicht von Holz und Holzverbundstoffen in Vorschriften anderer Staaten. M 31 B formuliert Maßnahmen zur Verbesserung der stofflichen Verwertung, indem Holzgehäuse und -rückwände von Radio- und Fernsehgeräten sowie Lautsprechern entfernt werden sollten.

### **Position AG und AK**

Die Separation von Holz und Holzverbundstoffen erhielt Zustimmung. Es wurde die Kantenlänge von 50 cm auf 25 cm reduziert.

Nach der letzten AK-Sitzung erfolgte eine schriftliche Stellungnahme einiger Erstbehandler zur Änderung der Anforderung: „Es ist zu vermeiden, dass Holz und Holzverbundstoffe in Fraktionen verschleppt werden, die zur stofflichen Verwertung von Kunststoffen vorgesehen sind.“ Weder die vorgeschlagene Vorgabe für Geräte > 50 cm noch eine evtl. Vorgabe für kleinere Geräte erscheinen sinnvoll. Bei der Behandlung in großen Zerkleinerungsanlagen (Shredder für Konsumgüterschrotte) spielt die Kunststoffrückgewinnung mit Ausnahme der Entnahme großer Bauteile keine Rolle. Kleinere Geräte mit Holzanteil dagegen müssen meist vor einer mechanischen Behandlung aussortiert werden.

### **Behandlungsanforderung 41:** Separation der Staubsaugerbeutel vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Gering

#### **Bestehender Rechtsrahmen**

Eine Vorgabe im ElektroG zur Separation von Staubsaugerbeuteln besteht nicht.

#### **Status Quo**

Einige Erstbehandlungsanlagen entnehmen sie, andere nicht. Für eine Separation müssen die Staubsauger aus dem gemischten Inputstrom entnommen werden, wobei sie je nach Größe sowohl in der Gruppe Großgeräte als auch in der Gruppe Kleingeräte vorkommen können. Für die Gruppe Großgeräte ist aufgrund der bestehenden Entfrachtungsanforderungen der Anlage 4 ElektroG in jedem Fall eine Inspektion der Anlieferung erforderlich. Die Gruppe Kleingeräte wird meist nicht auf Vorkommen von Staubsaugern inspiziert.

#### **Mengenpotenzial**

Entsprechend den Ergebnissen der Sortieranalysen aus dem UBA-Projekt RePro besteht die alte Sammelgruppe 5 zu 12 % (stückbezogen: 14 %) aus Staubsaugern. Eine ausreichend qualifizierte Datengrundlage zu den Mengen der noch mit Staubsaugerbeutel befüllten Altgeräte liegt nicht vor.

#### **Ökologische Aspekte**

Hausstaub ist ein Reservoir für Chemikalien, darunter viele Verbindungen mit bekannten oder vermuteten gesundheitlichen Auswirkungen, wie Mitro et al. in amerikanischen Hausstaub 2016 feststellten. Es konnten konsequent Chemikalien aus mehreren Klassen gefunden werden. Phthalate traten in den höchsten Konzentrationen auf, gefolgt von Phenolen, neuartigen Flammschutzmitteln, synthetischen Duftstoffen und Perfluoroalkyl-Verbindungen. Mehrere Phthalate und neuartige Flammschutzmittel hatten im Hausstaub aus Wohnungen die höchsten Konzentrationen. Viele Chemikalien weisen Gefahrenmerkmale wie reproduktive und endokrine Toxizität auf [117]. Der Inhalt der Staubsaugerbeutel stellt in Deutschland sicherlich ein ähnliches Bild dar. Jedoch ergaben diese Untersuchungen keine Schadstoffkonzentrationen, nach denen die Inhalte von Staubsaugerbeuteln als gefährlicher Abfall zu deklarieren wäre.

Zur Vermeidung der Verschleppung der Staubsaugerbeutelinhalt in andere Fraktionen, z. B. bis in die nichtmetallische Restfraktion, sollten diese vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung aus dem Strom entnommen werden.

#### **Ökonomische Aspekte**

Es liegen keine Daten vor.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Da auch die Entnahme der Staubsaugerbeutel auf den Sammelhöfen bzw. bei den Vertreibern durch das Personal oder dem Bürger vor Einwurf in den Sammelcontainer denkbar wäre, könnte der Aufwand bei den Erstbehandlungsanlagen vermieden werden. Dies würde aber ein Passus im ElektroG bedürfen.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Separationsvorschriften für Staubsaugerbeutel vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Es gibt keine Separationspflicht von Staubsaugerbeutel in Vorschriften anderer Staaten. LAGA M 31 B empfiehlt die Entnahme der Staubsaugerbeutel.

### **Position AG und AK**

Teilweise gab es während der letzten AK-Sitzung Zustimmung, teilweise Ablehnung bei den Akteuren gegenüber dem UBA. Den Folgebehandler der Kunststofffraktion stört die Staubfraktion nicht in der Aufbereitung.

Im Anschluss an die letzte AK-Sitzung wurde in der schriftlichen Stellungnahme einiger Erstbehandler mitgeteilt, dass die Entfernung von Staubsaugerbeuteln aus Arbeitsschutz- und gesundheitlichen Gründen durch den Bürger vor der Abgabe vorzunehmen sei. Eine Festschreibung als Forderung an Erstbehandlungsanlagen biete nur eine kontraproduktive Rechtfertigung für Fehlverhalten der Bürger und unzureichende Information auf den Sammelstellen. Zudem sei die Entnahme von zerrissenen Staubbeuteln unter Arbeitsschutzaspekten kritisch zu sehen. Besondere Schutzmaßnahmen gegen Hausstaub beim Sortieren seien angesichts der Materialmischung innerhalb der SG 5 nicht darstellbar.

#### 4.4.2 Ausschleusung polybromierter Flammschutzmittel in Kunststoffen zur werkstofflichen Verwertung

*Hinweis: Mittlerweile (Stand: März 2020) wird der durch die Behandlungsanforderungen 42 und 43 vom UBA verfolgte Ansatz aufgrund neuer Erkenntnisse und der geänderten Rechtslage nicht weiterverfolgt.*

**Behandlungsanforderung 42:** Für Kunststofffraktionen zur werkstofflichen Verwertung: Gesamt Bromgehalt max. xxx ppm; bei > xxx ppm nur werkstoffliche Verwertung, wenn nachgewiesen wird, dass die Überschreitung des Wertes nicht von den nach POP-VO, REACH und RoHS in ihrer jeweils geltenden Fassung regulierten bromhaltigen Stoffen verursacht wird, sonst Abtrennung und Zuführung der über xxx ppm Gesamt Bromgehalt belasteten Kunststofffraktionen zur Behandlung entsprechend POP-VO; liegt Gesamt Bromgehalt unterhalb von xxx ppm, dann stimmt der Betreiber der Behandlungsanlage mit der Schadstoffentfrachtungsanforderung für bromierte Flammschutzmittel überein

**Adressat:**

EBA (verantwortlich für den Entsorgungsweg der Kunststofffraktion)

**Monitoring:**

Überprüfungspflicht als turnusmäßige Routine (z. B. vierteljährlich oder wenn sich der Anlageninput wesentlich verändert) sowie Prüfung durch Kontrolle der Betriebstagebücher und der Analyseprotokolle durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologische Aspekte:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 43:** Verpflichtende Separation von Kunststoffteilen eines Altgerätes, die durch POP-VO geregelte Flammschutzmittel oberhalb der festgelegten Grenzwerte enthalten vor einer (Grob-) Zerkleinerung; unterstützend kann eine Liste erstellt werden mit betroffenen Geräten

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering für Betriebe, die ein Separationskonzept für spezifizierte Geräte implementiert haben; Mittel für Betriebe, die einmalige Transaktionsaufwendungen haben

**Ökologische Aspekte:**

Hoch

#### Bestehender Rechtsrahmen

Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, müssen aus getrennt gesammelten Altgeräten nach Anlage 4, Nummer 1 e) ElektroG entfernt werden.

Die RoHS-Richtlinie in der ursprünglichen Fassung (RICHTLINIE 2002/95/EG) bestimmt, dass ab dem 01. Juli 2006 neu in Verkehr gebrachte Elektro- und Elektronikgeräte keine

polybromierten Diphenylether (PBDE) enthalten dürfen. Die novellierte RoHS-Richtlinie (RICHTLINIE 2011/65/EU) limitiert den Einsatz von PBDE auf Konzentrationen von < 0,1 % im homogenen Werkstoff.

Weiterhin sind in der ChemVerbots-VO Penta- und OctaBDE seit 2003 mit Gehalten > 0,1 Gew.-% verboten [118].

Die POP-VO fordert neben Bestimmungen zur Herstellung, zum Inverkehrbringen und Verwendung auch abfallwirtschaftliche Maßnahmen unter anderem für Tetrabromdiphenylether, Pentabromdiphenylether, Hexabromdiphenylether und Heptabromdiphenylether, die bei der Verwertung von Abfällen in der Summe eine Konzentration von 1.000 mg/kg nicht überschritten werden darf. Die POP-VO bestimmt, dass Teile eines Altgerätes, die die in Anhang IV aufgelisteten bromierten Flammschutzmittel enthalten, separiert und entsprechend POP-VO beseitigt werden müssen.

Das KrWG formuliert in § 9 Absatz 2 ein Vermischungsverbot von gefährlichen Abfällen mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien.

DecaBDE wurde bei dem achten Treffen der "Conference of the Parties to the Stockholm Convention" auf die Verbotsliste gesetzt [119]. Die Aufnahme von DecaBDE mit den Ausnahmen soll Ende 2018 in Kraft treten. Bis dahin muss die EU-POP-VO (VO/850/2004) entsprechend angepasst werden, welche Ausnahmen möglich sein sollen und wie die Abfälle zu behandeln sind, also die Anhänge I, IV und V.

### **Status Quo**

Zwar fordert das ElektroG die Entfernung von Kunststoffen, die bromierte Flammschutzmittel enthalten, doch Hinweise zu Grenzwerten, der Identifikation oder Analyse sowie dem weiteren Vorgehen mit diesen entfernten Kunststoffen finden sich derzeit nicht im Gesetz. Eine Technologie zur automatischen Ausschleusung von polybromierten Flammschutzmittel-haltigen Kunststoffteilen aus der allgemeinen Kunststofffraktion existiert nicht. Auch eine gezielte Demontage dieser Teile wird heute bei der Erstbehandlung in der Regel nicht durchgeführt. In vielen Fällen ist nicht bekannt, ob ein Kunststoffteil entsprechende bromierte Flammschutzmittel-Gehalte aufweist. Damit findet derzeit eine Vermischung und Verdünnung der POP-haltigen mit unbelasteten Kunststoffen statt. Die POP-VO gibt die Separation in der Behandlungskette von EAG nicht vor. Insofern ist die Separation beim Folgebehandler rechtlich nicht ausgeschlossen. Jedoch besteht ein Verdünnungsverbot (vgl. § 9 Abs. 2 KrWG). Der Abfallbesitzer muss sicherstellen, dass die bromierten Flammschutzmittel entsprechend den Anforderungen der POP-VO zerstört werden. Die Kunststofffraktion wird beim Folgebehandler daher so aufbereitet, dass sich nach der Schwimm-Sink-Trennung die POP-haltigen Kunststoffe in der Schwerfraktion befinden und zur energetischen/thermischen Verwertung zugeführt werden.

### **Mengenpotenzial**

Der Anteil von Kunststoffen mit Flammschutzmittel betrug im Jahr 2000 nach APME etwa 12 % aller eingesetzten Kunststoffe in dem Elektro- und Elektroniksektor. Hauptsächlich betrafen dies Fernsehgehäuse und Computermonitore sowie Computergehäusekunststoffe. Unter den PCs und Monitorkunststoffen waren 65 % mit Flammschutzmittel versetzt, Fernsehgeräte 55 % sowie Drucker und Kopierer 20 % [99]. Wäger et al. führen zusätzlich aus, dass 80 % der elektrischen Werkzeuge mit Flammschutzmittel versetzt sind und 77 % der Telekommunikationsgeräte [72]. Delgado et al. geben einen Anteil von 5,3 % an flammenschutzmittelhaltigen Kunststoffen an [104].

Im Jahr 2011 geben Wäger et al. an, dass PentaBDE keine Rolle mehr bei der Kunststofffraktion aus EAG spielt. OctaBDE wurde hingegen über dem RoHS-Grenzwert von 1 g/kg bei IT- und Telekommunikationsgeräten und Unterhaltungselektronik (ohne Bildschirmgeräte) gemessen. Kleingeräte wiesen einen Messwert nahe dem Grenzwert auf. DecaBDE hingegen wies Konzentrationen nahe oder über 1 g/kg in nahezu allen Proben auf. Weiterhin überstieg der Gesamtbromgehalt den Anteil der spezifisch bestimmten bromierten Flammenschutzmittel bei Weitem, was den Einsatz anderer bromierter Flammenschutzmittel, sogenannte neuartige bromierte Flammenschutzmittel, impliziert [120]. Eine Analyse über bromierte Diphenylether dänischer EAG ergab im Jahr 2012, dass die Konzentration in der Summe der POP-BDEs eingehalten wurde, jedoch bei Hinzunahme von DecaBDE deutlich höhere Werte gemessen wurden. Auch Mischkunststoffe wurden durch DecaBDE-Konzentrationen bestimmt. In allen Messwerten korrelierte der POP-BDE-Wert nicht mit dem Gesamtbromgehalt, der um ein Vielfaches höher lag [121]. In der Schweiz wurden Bildschirm- und Notebookgehäuse mit einem Gesamtbromgehalt von 12 g/kg gemessen, wobei LCD- und CRT-Geräte zusammen vermessen wurden. DecaBDE wies einen Wert von 3,3 g/kg auf [71]. Untersuchungen von Arends et al. aus dem Jahr 2015 führen aus, dass 29 % der Monitorfronten und 28 % der Monitorrückwände, jedoch nur 10 % der Monitorfüße Chlor/Brom enthalten. Die Monitorrückwände wiesen eine Bromkonzentration von 24 g/kg auf, die Monitorfüße 1,5 g/kg. Bei 37 % der Fernherrückwände ließ sich ein Bromwert über 1 g/kg messen und nur 6 % der Fernsehfronten überschritten den Wert. Hier wurde nicht ausgeführt, ob zwischen Flachbildschirmgeräten und CRT-Geräten unterschieden wurde [122].

Untersuchungen von 10 Rückwänden aus Flachbildschirmgeräten aus dem SV-Gutachten im Jahr 2015 ergaben, dass keine verbotenen polybromierten Flammenschutzmittel gefunden wurden. Jedoch wurde ein Bromgesamtgehalt bei der PS-Fraktion von 16,4 g/kg und bei der ABS-Fraktion bei 4,5 g/kg gemessen, was auf andere bromierte, nicht POP-beschränkte Flammenschutzmittel schließen lässt [9].

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Durch die Ausschleusung wird der Kunststoffkreislauf von bromierten Flammenschutzmitteln entlastet und eine Verschleppung im Rohstoffkreislauf vermieden. Für eine Quantifizierung des ökologischen Nutzens (Ausschleusung von bromierten Flammenschutzmitteln) und möglichen ökologischen Nachteilen (Verlust von Kunststoffmengen für ein Recycling) aus der Festlegung des Wertes bei 2.000 ppm liegen keine Quellen vor. Die Setzung des Brom-Maximalgehaltes von 2.000 ppm führt dazu, dass potenziell auch Kunststoffe ausgeschleust werden, die keine regulierten bromierten Flammenschutzmittel enthalten.

Zu den nachteiligen Eigenschaften der polybromierten Flammenschutzmittel gehört, dass sie biologisch schlecht abbaubar sind, sich in der Nahrungskette anreichern und bei ihrer Verbrennung oder bei höheren Verarbeitungstemperaturen die sehr toxischen, polybromierten Dibenzofurane entstehen können. Sie können Erkrankungen der Haut (Chlorakne), Schädigung der Leber und neurotoxische Wirkungen hervorrufen.

### **Ökonomische Aspekte/Aufwand**

Eine Orientierung an einem maximalen Bromwert als orientierendem Summenparameter (anstelle einer aufwendigen Analytik für einzelne bromierte Flammenschutzmittel) reduziert den Aufwand für die Einhaltung der rechtlichen Anforderungen. Die Analysekosten für eine Bromgesamtkonzentration liegen in der Größenordnung von 20 €/Analyse, die für einzelne bromierte Flammenschutzmittel zwischen 130 €/Analyse und 160 €/Analyse nach mündlicher Auskunft eines Analyselabors im Jahr 2017.

Im Falle der Kunststofffraktionen, die bei einer spezifischen Behandlung anfallen und bei denen bekannt ist, dass die POP-VO-Werte für regulierte bromierte Flammschutzmittel überschritten werden, ist durch den gegebenen Rechtsrahmen bereits eine Steuerung in die geeigneten Entsorgungswege bestimmt. Somit ergibt sich kein Zusatzaufwand im Vergleich zur Einhaltung der bestehenden rechtlichen Anforderungen für die Behandlungsanforderung 43.

In den EBA, in denen kein Separationsschritt auf Geräteebene vorgenommen wird, entstünden einmalige Transaktionskosten zur Umstellung der Prozesse. Da nach der Umstellung der Prozesse Synergieeffekte erzielt werden könnten (u. a. mit anderen Behandlungsanforderungen), wäre der Aufwand im laufenden Betrieb nicht so hoch.

Nachdem der Hauptexportweg nach China sich ab 2018 verschlossen hat, kommt in der Fachpresse zur Sprache, dass zuvor schadstoffbelastete minderwertige Fraktionen exportiert wurden. Da ein Rückstau solcher Kunststoffe in Deutschland auftreten wird, besteht der Bedarf, hochwertige und schadstoffbelastete Fraktionen zu erzeugen. Dieses ist auch im Interesse der Entsorger, da die Aufwand- und Erlössituation davon abhängt. Inzwischen besteht eine Sensibilität, die POP-Verordnung zu beachten.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Derzeit besteht eine schwache Datengrundlage hinsichtlich der Frage, welche Altgeräte und welche Komponenten für eine Separation vor einer Zerkleinerung relevant sind. Ein Versuch zur Absicherung und Weiterentwicklung einer „Verdachtsliste für Altgeräte mit nach POP-Verordnung relevanten bromierten Flammschutzmitteln“ muss durchgeführt werden.

Dazu müssen weitere Analysen zu Art und Konzentration der einzelnen Flammschutzmittel sowie der Bromgesamtkonzentration in der Kunststofffraktion durchgeführt werden. Damit lässt dies erst eine Entscheidung zu, ob auf einen Bromgesamtwert wie in der CENELEC TS 50625-3-1 abgestellt werden kann und bei welchem ppm Wert er anzusetzen wäre, um mit der Schadstoffentfrachtungsanforderung nach POP-VO übereinzustimmen.

Weitere Analysen sind in Planung und werden zeitnah durch das UBA in Auftrag gegeben, was das ReFoPlan-Vorhaben „Klärung zusätzlicher Aspekte zur Aufstellung von Behandlungsanforderungen von Elektroaltgeräten im Rahmen einer geplanten Behandlungsverordnung“ (FKZ 3718 33 331 0) klärt.

### **CENELEC**

CENELEC TS 50625-3-1 beschreibt, dass für die Kunststofffraktion, die bromierte Flammschutzmittel (d. h. Kunststoffe aller EAG-Kategorien außer Großgeräte und Kühl- und Tiefkühlgeräte) enthalten können, ein Trennvorgang dieser bromierten Flammschutzmittel sicherzustellen ist, wenn die Brom-Gesamtkonzentration über 2000 ppm liegt. Wenn keine Angaben zum Inhalt der bromierten Flammschutzmittel vorliegen oder die Konzentration über 2000 ppm liegt, muss die Kunststofffraktion nach entsprechender Gesetzgebung (bspw. POP-VO) behandelt werden. Wenn die Brom-Gesamtkonzentration unterhalb von 2.000 ppm liegt, dann stimmt der Betreiber der Behandlungsanlage mit der Schadstoffentfrachtungsanforderung für bromierte Flammschutzmittel überein.

Damit stellt die CENELEC-Norm nicht explizit auf die in der POP-VO aufgeführten Flammschutzmittel ab und nutzt einen pragmatischen Ansatz. Jedoch besitzt der festgelegte Wert von 2.000 ppm nach unserem Kenntnisstand keinen wissenschaftlich nachgewiesenen Ursprung. Weiterhin ist in der CENELEC-Norm zwar die Probenahme für Kunststoffe beschrieben, jedoch werden derzeit keine spezifischen Angaben für die Laborvermessung vorgegeben. Es stellte sich beispielsweise bei unseren Laboranalysen heraus, dass es bedeutend ist, bis zu welchem Zerkleinerungsgrad die Probe für den Aufschluss vorbereitet wird.

## Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

In Österreich sind laut AbfallBPV Kunststoffe zu entfernen, die bromierte Flammschutzmittel enthalten. Wenn für die Kunststofffraktion ein Gesamtbromgehalt von größer oder gleich 2000 mg/kg nicht ausgeschlossen werden kann, ist mittels eines Qualitätssicherungssystems die Ausschleusung sicherzustellen, wenn die Kunststoffe für eine stoffliche Verwertung bestimmt sind. Für Kunststoffe aus der selektiven Zerlegung mit erwartungsgemäß hohen Gehalten an bromierten Flammschutzmitteln (Kunststoffe aus Bildschirmgeräten und Fotokopierern bzw. Multifunktionsgeräten) ist eine kontinuierliche Messung des Gesamtbromgehaltes bei stofflicher Verwertung der Kunststoffe vorzunehmen.

Die Technischen Vorschriften zur Entsorgung von EAG in der Schweiz regeln, dass Kunststofffraktionen aus der Aufbereitung von EAG stofflich verwertet werden können, wenn die in der ChemRRV (Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen – Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung) festgelegten Grenzwerte für Stoffe mit flammhemmender Wirkung und Schwermetalle eingehalten werden (0,1 % polybromierte Biphenyle nach RoHS-Richtlinie, PentaBDE, OctaBDE und DecaBDE sowie Cadmium nach RoHS-Richtlinie). Das Erreichen der Grenzwerte darf nicht durch Verdünnen mit Kunststoffen aus anderen Anwendungsbereichen erreicht werden. Kunststofffraktionen aus der Aufbereitung von EAG, welche nicht stofflich verwertet werden können, sind einer energetischen Verwertung zuzuführen. Die Einhaltung der Grenzwerte ist durch regelmäßige, repräsentative Messungen nachzuweisen. Die Nachweise müssen den Kontrollexperten auf Verlangen jederzeit vorgelegt werden können.

Nach LAGA M 31 B sind Kunststoffe ohne bromierte Flammschutzmittel möglichst hochwertig werkstofflich, rohstofflich oder energetisch nach den Grundsätzen des KrWG (§§ 6-9) zu verwerten. Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmitteln sollten aus Vorsorgegründen vorzugsweise einer energetischen/thermischen Verwertung zugeführt werden.

## Position AG und AK

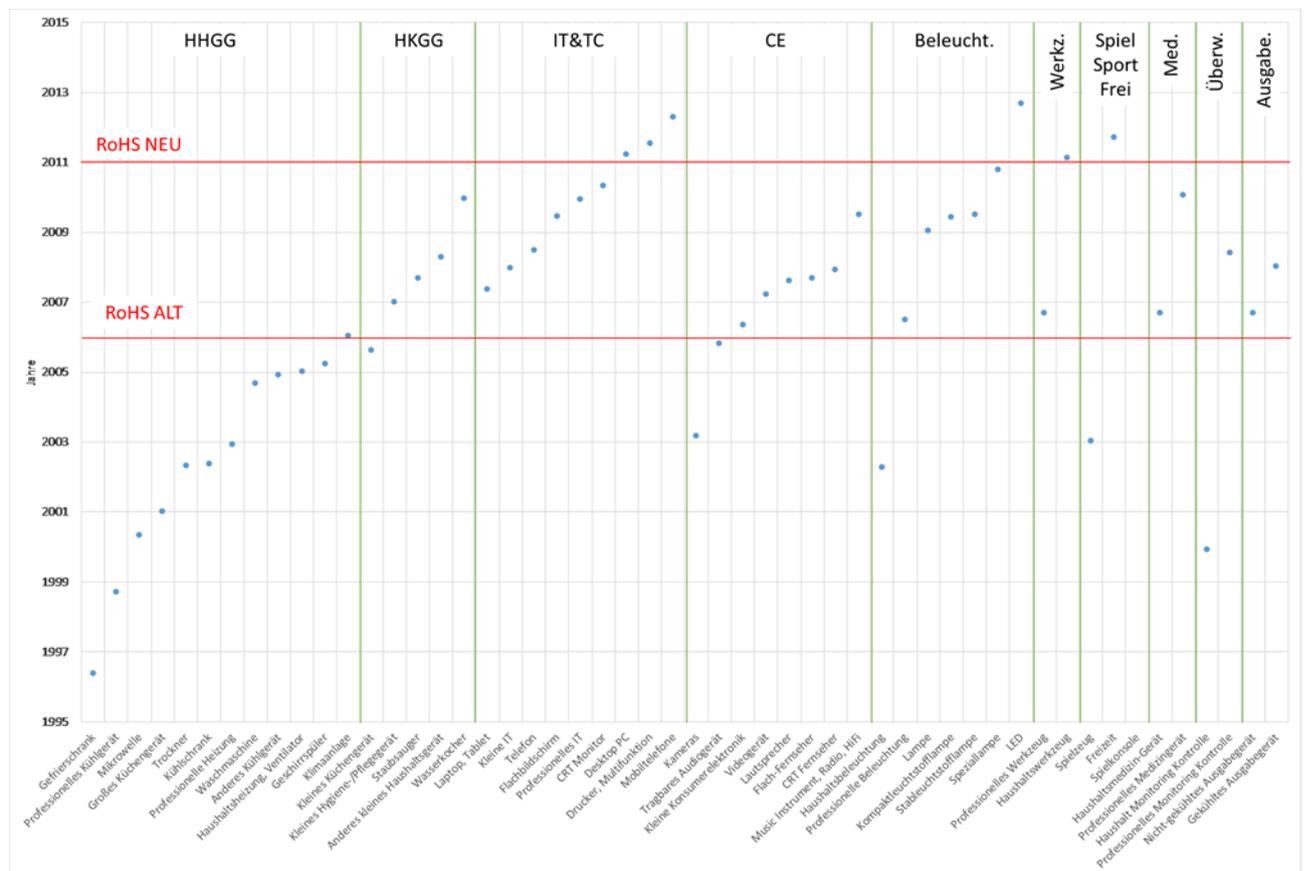
Einige Erstbehandler gaben nach der letzten AK Sitzung folgende Stellungnahme ab: um Kunststoffe vorab auszusortieren, die Flammschutzmittel oberhalb der Grenzwerte der POP-VO enthalten, muss sinnvollerweise im Vorhinein mit maßgeblicher Unterstützung durch die Hersteller, eine indikative Liste der Gerätearten erstellt werden, die diese Stoffe enthalten können. Derzeit verwendete Prüfmittel geben häufig ein verfälschtes Bild und führen zu falschen Schlussfolgerungen. Geeignete Trennverfahren von Kunststoffgemischen in Folgebehandlungsanlagen sollten zwingend vorgegeben werden. Es wurde daher der Vorschlag der Neuformulierung der Anforderung unterbreitet, dass Kunststofffraktionen, die die Grenzwerte der POP-VO überschreiten, in Anlagen zu liefern sind, die geeignete Trennverfahren einsetzen, um die bromhaltigen Bestandteile zu separieren. Weiter führt die Stellungnahme aus, dass Kunststoffe aus EBA, die an qualifizierte Kunststoffbehandlungsanlagen zur Weiterbehandlung verbracht werden, nicht als gefährliche Abfälle eingestuft werden dürften. Die Kapazitäten solcher Anlagen liegen zumeist im europäischen Ausland und nicht in Deutschland. Ein deutscher Alleingang zur Einstufung dieser Kunststoffe als gefährlicher Abfall würde die Verbringung in solche Anlagen und die angestrebte Verwertung der Kunststofffraktionen vereiteln.

## Spezifische Begründungen

Untersuchungen zu Flammschutzmittelgehalten zeigen, dass das Alter der Altgeräte Einfluss auf den möglichen Präsenz von bromierten Flammschutzmitteln hat. Deutlich wird in der Abbildung

19, dass vor allem Haushaltsgroßgeräte, die heute als Altgeräte anfallen, aus einer Zeit stammen, in der PBDE noch nicht durch die RoHS beschränkt waren. Außerdem wurden die meisten Gerätegruppen, die jetzt als Abfallpotenzial anfallen, in der Zeit vor der novellierten RoHS-Richtlinie in Verkehr gebracht. Dies ergeben Auswertungen von Ökopol während des UFOPLAN-Vorhabens, die mit durchschnittlichen Nutzungsdauern von Balde et al. berechnet wurden [123].

**Abbildung 19: In-Verkehr-Bringung und Anfall der derzeit entsorgten PBDE-belasteten Kunststoffe mit durchschnittlicher Nutzungsdauer nach [123]**



Eigene Untersuchungen zu Art und Konzentrationen von ausgewählten bromierten Flammenschutzmitteln sowie zur Gesamtbromkonzentration von Kunststofffraktionen wurden an 6 spezifischen EAG-Gerätearten durchgeführt, siehe Tabelle 31. Bei diesen Gerätearten bestand nach Literaturrecherche eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von bromierten Flammenschutzmitteln.

**Tabelle 31: Analysen zu Art und Konzentration von ausgewählten bromierten Flammenschutzmitteln sowie Gesamtbromkonzentration in ppm**

	Gerätegruppe												
	Drucker, Scanner, Kopierer		Werkzeuge		Unterhaltungselektronik		Telefone		Computer, Dockingstationen		Kleingeräte, die heiß werden		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
BDE 28	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
BDE 47	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
BDE 99	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
BDE 100	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
BDE 153	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
BDE 154	< 0,5	6,8	< 0,5	6,5	< 0,5	12	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	2,1
BDE 183	1,2	47	< 0,5	60	1,5	53	< 0,5	1,2	< 0,5	3,2	1,7	13	
BDE 196 / 197 / 203	0,55	26	< 0,5	29	0,66	20	< 0,5	< 1	< 0,5	1,1	0,68	4,7	
BDE 209	< 10	350	< 10	210	< 10	5.100	< 10	39	< 10	11	45	4.700	
HBCD	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 20	< 1	< 2	< 2	< 2	< 10	< 20	
TBBPA	4.900	380	11	620	6,7	4.000	25	36	1	9,5	19.000	4.700	
BTBPE	< 1	< 1	< 1	2,2	< 1	380	14	6,9	< 1	< 1	2	24	
DBDPE	2.100	320	< 5	< 5	< 5	25	< 5	1	48	53	12	100	
Brom gesamt	2.000	2.300	400	600	3.300	3.100	200	500	1.200	1.400	5.700	6.500	

Die erhaltenen Analysen von jeweils zwei Probenahmen je Geräteart ergaben bisher kein eindeutiges Bild. Damit ließ sich keine begründete Liste mit Verdachtsgeräten erstellen. Auch ließ sich der Wert von 2.000 ppm aus der CENELEC-Norm als Entscheidungswert, ob eine Kunststofffraktion bei Unterschreitung dieses Wertes der Schadstoffentfrachtungsanforderung genügt, nicht verifizieren. Im Hinblick auf die Neuaufnahme von DecaBDE (BDE 209) in die POP-VO bleibt abzuwarten, wie sich die zukünftige Grenzwertfestlegung für Kunststofffraktionen, die in das Recycling gehen, ausgestaltet.

Würde theoretisch nur das DecaBDE als Flammenschutzmittel in einem EAG eingesetzt worden sein, läge dessen Konzentration bei 2.401 ppm, wenn der Gesamtbromwert von 2.000 ppm als Entscheidungswert zu Grunde gelegt wird und der Behandler somit der Schadstoffentfrachtungsanforderung nach der CENELEC-Norm Genüge getan hätte. Dies würde aber voraussichtlich nicht mit der POP-VO übereinkommen, denn diese hat bisher als Grenzwert einen Summenwert von 1.000 ppm für alle bromierten Flammenschutzmittel für Kunststofffraktionen gefordert, die in das Recycling gehen.

## 4.5 AG 5 – Schadstoffentfrachtung

### Behandlungsanforderung 44: Separation des Quecksilbers in dental-medizinischen Elektroaltgeräten

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Über Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

#### Bestehender Rechtsrahmen

Quecksilberhaltige Bauteile müssen gemäß Anlage 4 Nr. 1 a) ElektroG aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden.

#### Status Quo

Quecksilberhaltige Bauteile sind neben Lampen und Schaltern auch für medizinische Geräte (Behandlungseinheiten in Zahnarztpraxen), Messgeräte und Werkzeuge relevant. Quecksilberkontaminierte Bauteile sind gezielt manuell zu entfernen. Zu den Behandlungseinheiten gehören Traps, wasserabführende Schläuche, in der Regel eine Separiereinheit (Trennung von Luft und Wasser) und gegebenenfalls auch ein integrierter Amalgamabscheider. Alle Geräteteile können mit Amalgam behaftet sein. Amalgam besteht bis zu ca. 50 % aus Quecksilber, 20-30 % Silber und anderen Metallen. Aufgrund des hohen Quecksilbergehaltes wird Amalgam unter der Abfallschlüsselnummer 180110\* (Amalgamabfälle aus der Zahnmedizin) als gefährlicher Abfall geführt. Für die Reinigung können zum Teil Maschinen eingesetzt werden, doch ein nicht unerheblicher Teil muss manuell gereinigt werden. Alle Reinigungsmaschinen und Waschplätze müssen an einer speziellen Abwasseraufbereitungsanlage angeschlossen sein, um das Amalgam herauszufiltern und einer Verwertung zuzuführen. Geräteteile aus Kunststoff (z. B. wasserabführende Schläuche), die sehr lange mit Amalgam in Berührung gekommen sind, können aufgrund ihrer hohen Quecksilberrückstände nicht mehr der Kunststoffverwertung zugeführt werden. Diese müssen je nach Quecksilbergehalt in einer Müllverbrennungsanlage, einer Sonderabfallverbrennungsanlage oder Sonderdeponie entsorgt werden.

Jede zahnmedizinische Einrichtung muss ihre dentalen Prozessabwässer aus der Patientenbehandlung über einen sogenannten Amalgamabscheider führen, damit kein Quecksilber in das öffentliche Abwassernetz gelangt. Der dezentrale oder integrierte Amalgamabscheider befindet sich direkt in der Behandlungseinheit und filtert nur die Abwässer aus dieser Behandlungseinheit. Der Trend geht jedoch zur zentralen Amalgamabscheidung. An diesem Gerät werden mehrere Behandlungseinheiten angeschlossen, sodass mit einem Gerät das Abwasser mehrerer Behandlungseinheiten gefiltert werden kann. Beide Gerätetypen sind stark mit Amalgamrückständen behaftet. Der im Amalgamabscheider befindliche Sammelbehälter ist vor der Geräteentsorgung zu entnehmen und separat als gefährlicher Abfall zu entsorgen, was von den Gerätebetreibern nicht konsequent ausgeführt wird. Der Amalgamabscheider muss also auch zunächst einer Reinigung unterzogen werden, um ihn anschließend in eine weiterführende stoffliche Verwertung geben zu können.

Amalgammischgeräte enthalten zum Zeitpunkt der Entsorgung in dem Gerät reines Quecksilber, welches durch ein spezielles Verfahren entfernt werden muss.

Gelangen EAG mit Quecksilberhaltigen Bauteilen nicht zu spezialisierten Entsorgern und kommen in die mechanische Vorzerkleinerung bei einer Erstbehandlung, können diese zerstört, Quecksilber freigesetzt und die Abluft sowie das Schreddermaterial kontaminiert werden.

### **Mengenpotenzial**

Es liegen dazu keine Daten vor.

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Durch die Separation von Hg-haltigen und Hg-kontaminierten Komponenten wird die (weitere) Kontamination von Abfallfraktionen und Hg-Emissionen vermieden.

Quecksilber kann durch Destillation in hoher Qualität zurückgewonnen werden.

Es ist schädlich für den Menschen und die Umwelt. Der Umgang mit Quecksilberhaltigen Bauteilen ist unter Aspekten des Arbeits- und Gesundheitsschutzes, des Emissionsschutzes und des Umweltschutzes zu beachten, denn Quecksilber wird vor allem inhalativ aufgenommen. Eine Aufnahme über die Haut oder oral ist ebenfalls möglich. Die Aufnahme von Quecksilber zeigt akute und chronische Symptome (Minimata-Krankheit) und wirkt reproduktionstoxisch. Quecksilber ist sehr giftig für Wasserorganismen und wirkt bioakkumulativ in der Nahrungskette. Es ist stark wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 3) und gilt als Meeresschadstoff.

### **Ökonomische Aspekte**

Im Vergleich zum mechanischen Aufschluss stellt die oftmals manuell durchzuführende Separation von Hg-haltigen oder mit Hg kontaminierten Komponenten einen deutlichen Mehraufwand dar. Da eine Erfüllung der Anforderungen des ElektroG praktisch aber nur erfolgen kann, wenn die Separationsschritte vor dem mechanischen Aufschluss erfolgen, ergibt sich kein Mehraufwand durch diese Empfehlung zur Behandlungsanforderung im Vergleich zur Erfüllung der bestehenden rechtlichen Anforderungen.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Angaben diesbezüglich vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die Technischen Vorschriften zur Entsorgung von EAG in der Schweiz geben für Dentalgeräte vor, dass diese Sonderabfälle sind. Der Entsorger braucht somit eine Sonderabfallbewilligung. Amalgamabscheider (Sammelgefäß) einschließlich zuführende Absaugschläuche sind manuell abzutrennen und separat zu entsorgen. Die Sammelgefäße sollten zwar schon entfernt worden sein, es ist aber nicht ausgeschlossen, dass eines vergessen wurde. Absaugschläuche, welche dem Amalgamabscheider mit Amalgam kontaminiertes Wasser zugeführt haben, sind in einer geeigneten Anlage mit weitergehender Rauchgasreinigung zu verbrennen und dürfen auf keinen Fall einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Die AbfallBPV in Österreich gibt vor, dass aus amalgamhaltigen Abfällen Quecksilber und die Legierungsmetalle (Silber, Zink, Zinn, Palladium, Kupfer) zurückzugewinnen sind. Bei der Rückgewinnung ist die Abluftkonzentration an Quecksilber mit 0,05 mg/m<sup>3</sup> zu begrenzen. Abwasserführende Rohrleitungen, die mit Amalgam kontaminiert sind, werden gemeinsam mit dem Rohrinhalt erfasst und sind als gefährlicher Abfall zu behandeln.

## Position AG und AK

Diese Problematik wurde von einem Akteur auf der letzten AK-Sitzung eingebracht.

**Behandlungsanforderung 45:** Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von zugänglichen, aber vom Altgerät umschlossene Altbatterien aus batteriebetriebenen Altgeräten, die nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG im eigenen Behältnis getrennt von anderen Altgeräten gesammelt wurden

**Adressat:**

EBA, die Mengen von örE bekommt  
Vertreiber Mengen, Herstellereigenrücknahmen und Mengen von optierenden örE müssen nicht nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG gesammelt werden und fallen hier nicht unter die Behandlungsanforderung

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Definition:**

Zugängliche, aber vom Altgerät umschlossene Batterien sind solche, die ohne den Gebrauch von Universalwerkzeug entnommen werden können (z. B. unter Klappdeckel, Schiebeklappe, Gehäuseschale, oder geklippt). Siehe auch Kapitel 6 Definitionen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Hoch

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 46:** Zerstörungsfreie Separation von nicht zugänglichen Altbatterien während der Behandlung; nach Entfernung müssen Altbatterien nach chemischen Systemen und Typengruppen untergliedert werden können

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Definition:**

Nicht zugängliche Batterien sind alle sonstigen Batterien, die sich nur mit Werkzeug entnehmen lassen (z. B. unter verschraubter Abdeckung, verklebte Batterien). Siehe auch Kapitel 6 Definitionen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 47:** Grenzwert von 100 mg Cd / kg der feinsten nichtmetallischen Restfraktion

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Jährliche Berichterstattung über chemische Analysen der feinsten nichtmetallischen Restfraktion (z. B. quartalsweise) und Kontrolle durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-1 Hier stehen Ihre Informationen.

**Behandlungsanforderung 48:** Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro t des Inputs in Summe für Kategorie 5 Kleingeräte und Kategorie 6 kleine IT- und Telekommunikationsgeräte

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Daten in Betriebstagebüchern dokumentiert. Empfehlung einer jährlichen Berichterstattung. Bei Unterschreitung wird eine Überprüfung durch den Betrieb empfohlen, die von dem durch Sachverständigen bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde angeordnet wird. Bei wiederholter Unterschreitung ist eine Optimierungskonzept der Batterieseparation oder ggf. eine Anpassung des Zielwertes vorzunehmen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-1

### Bestehender Rechtsrahmen

Altbatterien und Altakkumulatoren müssen nach § 4 Absatz 1 Satz 2 ElektroG möglichst so gestaltet sein, dass die Altbatterien oder Altakkumulatoren problemlos durch den Endnutzer entnommen werden können. Sind diese nicht durch den Endnutzer problemlos entnehmbar, sind sie so zu gestalten, dass Altbatterien und Altakkumulatoren problemlos durch vom Hersteller unabhängiges Fachpersonal entnommen werden können. Nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG sind batteriebetriebene Altgeräte der Gruppe Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm<sup>2</sup> enthalten sowie der Gruppe Großgeräte und der Gruppe Kleingeräte und kleine Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik getrennt von den anderen Altgeräten in einem eigenen Behältnis zu sammeln. Nach Anlage 4 Nr. 1 b) ElektroG müssen die Batterien und Akkumulatoren aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden. Sie sind gemäß Anlage 4 Nr. 1 S. 4 ElektroG so zu entfernen, dass sie nicht beschädigt werden und nach der Entfernung identifizierbar sind.

## Status Quo

Eine Separation von Altbatterien aus batteriebetriebenen Altgeräten, die nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG im eigenen Behältnis getrennt von anderen Altgeräten gesammelt wurden, erfolgt in den wenigsten Fällen auf den Sammelhöfen, sodass vielfach die Behältnisse bei der Sammlung nicht generiert werden und kaum Chargen bei der Erstbehandlungsanlage angeliefert werden.

Einzelne Akteure nehmen bei Anlieferungen solcher Chargen zuerst eine manuelle Separation der Altbatterien aus solchen Geräten vor, bei denen dies vergleichsweise einfach durchführbar ist. Bei den anderen Altgeräten erfolgt eine mechanische (Grob-) Zerkleinerung. Bei einem mechanischen Aufschluss sollen die Altbatterien nicht beschädigt werden und das aufgeschlossene Material durchläuft Sortierkabinen, in denen manuell unter anderem die Batterien abgesammelt werden. Dennoch muss vor jeder mechanischen Aufbereitung eine permanente Sichtung im Vorherein zum Beispiel wegen der Lithiumbatterien erfolgen. Teilweise wird die absortierte Batteriefraktion nach dem Grobaufschluss an einem zweiten Arbeitsplatz nachsortiert, um mögliche Fehlsortierungen zu korrigieren (Kondensatoren, lithiumhaltig, beschädigt etc.). Teilweise werden in der Praxis aber auch ganze batteriebetriebene Altgeräte aussortiert, die manuell von Altbatterien entfrachtet werden. Die Entnahme wird oftmals durch feste Verbauung (z. B. Verklebung) von Batterien und Akkus im Geräteinneren erschwert. Die aussortierte Batteriefraktion wird an einem Batteriesortierer weitergegeben. Die gemischten Batteriefractionen gelangen in Sortieranlagen in Deutschland und werden nach elektrochemischen Systemen sortiert und den entsprechenden Verwertungsverfahren zugeführt.

Defekte Batterien gasen ggf. aus und stellen ein Gefahrenpotenzial für Transporteure, Sortieranlagenbetreiber und Verwertungsanlagen dar. Die Ausgasung kann schon bei Dellen in der Batteriehülle stattfinden. Brände entstehen auch durch beschädigte Lithium-Knopfzellen. Eine manuelle Entnahme der Batterien führt zu geringsten Schäden, denn eine Behandlung mit Prallmühle und Querstromzerspaner führt zu einer höheren Beschädigungswahrscheinlichkeit nach Ansicht der Batterieverwerter. Die Batterien weisen sehr unterschiedliche Qualitäten auf, die mitunter problematisch für die weitere Verwertung sind. Nicht selten werden stark beschädigte Altbatterien aus Elektroaltgeräten übergeben, deren Identifizierung und stoffliche Verwertbarkeit stark eingeschränkt sind. Diese Batterien können nur noch mit speziellen und aufwendigen Sicherheitsvorkehrungen einer geordneten Entsorgung zugeführt werden.

Zwar sollen nach Anlage 4 Nr. 1 S. 4 ElektroG die Altbatterien bei der selektiven Entfernung nicht beschädigt werden sowie nach der Entfernung identifizierbar sein, doch besteht derzeit keine praxisgerechte Definition von „nicht beschädigt“ und von „identifizierbar“.

## Mengenpotenzial

Im Jahr 2015 wurden 43.902 t Geräte-Batterien in Verkehr gebracht, wovon 19.678 t zurückgenommen wurden. Die Sammelquote von Gerätebatterien lag bei 45,3 % für die Rücknahmesysteme in Deutschland [124]. Es lassen sich keine offiziellen Zahlen und Publikationen finden, die den Anteil der Gerätebatterien in Elektroaltgeräten bei der Sammlung von Altbatterien angeben. Lediglich von der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS) wurde im Jahr 2014 angegeben, dass sich ca. 30 % der anfallenden Altbatterien in EAG befinden.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Die Brandgefahr, die von Lithiumionenbatterien bzw. -akkus ausgehen, wird durch zahlreiche Dokumentationen zu Bränden belegt. Schon bei einer geringen mechanischen Beanspruchung

bzw. bei einer Zerstörung des Gehäuses kann es zu einer Selbstentzündung kommen. Bleibt das Gehäuse intakt, stellt dieses einen Schutz dar.

In Batterien und Akkus sind zahlreiche ressourcenrelevante Metalle wie Kobalt, Nickel, Mangan oder Zink enthalten. Schadstoffrelevant sind zudem Cadmium und besonders Quecksilber, die schädlich auf Mensch und Umwelt wirken. Cadmium wirkt karzinogen, reproduktionstoxisch und mutagen. Es weist eine akute und chronische Toxizität auf. Außerdem ist Cadmium wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 1) und ist sehr giftig für Wasserorganismen. Die Aufnahme von Quecksilber zeigt akute und chronische Symptome (Minimata-Krankheit) und wirkt reproduktionstoxisch. Quecksilber ist sehr giftig für Wasserorganismen und bioakkumulativ in der Nahrungskette. Es ist stark wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 3) und gilt als Meeresschadstoff.

### **Ökonomische Aspekte**

Durch die Empfehlung zur Behandlungsanforderung 45 entsteht grundsätzlich ein zusätzlicher Aufwand im Vergleich zur Erfüllung bestehender rechtlicher Anforderungen. Hier wird gefordert, dass die separat gesammelten batteriebetriebenen Altgeräte vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Altbatterien zu entfrachten sind. Ob dies manuell oder mechanisch zu erfolgen hat, bleibt bei dieser Formulierung offen. Im Rahmen des UBA-Projektes RePro wurden Versuche zur Entnahme von Batterien aus kleinen EAG durchgeführt [17]. Es ergab sich je nach Einbausituation durchschnittliche Demontagezeiten zwischen 3,6 und 16,8 Sekunden. Im Beispiel von Laptops ergab sich eine Durchschnittszeit zur Entnahme von äußeren Akkus bei 3,5 Sekunden, die Durchschnittszeit zur Entnahme innerer Batterien lag bei durchschnittlich 30 Sekunden. Zu berücksichtigen ist bei der Bewertung der Zusatzaufwendungen, dass bei ca. 27 % der behandelten Altgeräte Synergieeffekte aufgetreten sind (vor allem bei manueller Demontage, bei der der Geräteverbund zerstört wurde), da gleichzeitig Leiterplatten, Displays, Motoren und Lautsprecher repariert werden konnten. Der Kostenaufwand kann dahingehend abgeschätzt werden, dass der zu erwartende zusätzliche Aufwand und damit die Personalkosten sich je Kleingerät auf 0,034 € bis 0,163 € bzw. bei Laptops entsprechend auf 0,034 € bis 0,29 € bei Arbeitskosten von 35 €/h belaufen. Die Anforderung bietet aber zukünftig die Möglichkeit, konkretisierende Verfahrensanforderungen an diese Charge zu stellen und so den Output Altbatterien an nachfolgende Batteriesortierer qualitativ zu verbessern, um so negative Umwelteinflüsse und Sicherheitsrisiken entgegen zu wirken. Unter der Annahme, dass eine Identifikation in jedem Fall erfolgen kann und somit eine Zuführung zu den entsprechenden Verwertungswegen vorliegt, stehen der Arbeitsschutz und die Sicherheitsaspekte bei dieser Empfehlung im Vordergrund.

Der Kostenaufwand für die Behandlungsanforderung 46 ändert sich für die Erstbehandler nicht, da sich der rechtliche Rahmen nicht ändert und lediglich um den Zusatz „nicht beschädigt“ und „identifizierbar“ nachgeschärft wurde.

Im Vergleich zur Ausgangslage kann die Grenzwerteinhaltung von 100 mg Cd/kg der feinsten nichtmetallischen Restfraktion der Behandlungsanforderung 47 zwar Zusatzaufwand durch Analysen verursachen, es handelt sich bei dieser Anforderung jedoch um eine sinnvolle und praktikable Operationalisierung des bestehenden rechtlichen Rahmens. Wird für eine Analyse ein Gesamtbetrag von 50 € angesetzt (mündliche Angabe eines Analyselabors im Jahr 2017), ergäben sich bei quartalsweisen Analysen 200 €/a. Dies wird als Worst-Case-Abschätzung gesehen, da bei stabilen Inputquellen und gleichbleibenden Prozessen die Analysefrequenz sicherlich geringer sein kann und Schwermetallanalysen oftmals eine Voraussetzung für die Entsorgung der feinsten nichtmetallischen Restfraktion sind.

Die Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro t des Inputs Kleingeräte in der Behandlungsanforderung 48 stellt eine Operationalisierung des bestehenden rechtlichen Rahmens dar und verursacht keine Zusatzkosten.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Die Sammlung bei den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern muss kontrolliert werden, sodass eine Separation der batteriebetriebenen Altgeräte nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG im eigenen Behältnis getrennt von den anderen Altgeräten stattfindet. Wir empfehlen außerdem die Mengen von Vertriebern, Herstellern und optierenden öRE bei der Behandlungsanforderung 45 zu berücksichtigen, sodass eine Anpassung des ElektroG hinsichtlich einer Erfassung der batteriebetriebenen Altgeräte nach § 14 Abs. 1 Satz 2 ElektroG für diese Akteure notwendig wäre.

### **CENELEC**

Der Grenzwert der Behandlungsanforderung 47 von 100 mg Cd/kg der feinsten nichtmetallischen Restfraktion stammt aus CENELEC TS 50625-3-1. Der Grenzwert kann von Erstbehandlungsanlagen nicht immer eingehalten werden, was dementsprechend auf eine mangelnde Separation der Altbatterien hindeutet, die nicht nach dem Stand der Technik erfolgt. Im Falle von Grenzwertüberschreitungen muss daher die Separation von Batterien optimiert werden.

Die Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro t des Inputs Kleingeräte in der Behandlungsanforderung 48 stammt ebenfalls aus CENELEC TS 50625-3-1. Dieser Zielwert wird nicht immer erreicht, spricht aber bei Erreichung des Wertes für eine zuverlässige Batterieseparation bei der Erstbehandlungsanlage.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die AbfallBPV in Österreich gibt lediglich an, dass Batterien vor mechanischer Belastung zu schützen sind.

LAGA M 31 B gibt für Batterien und Akkumulatoren an, dass diese vor einer mechanischen Zerkleinerung der Geräte vollständig entnommen werden. Sofern durch anderweitige technische Verfahren der Nachweis erbracht ist, dass bei der Behandlung keine Emissionen in die Umgebung freigesetzt werden, so dass der Schutz der menschlichen Gesundheit gewährleistet ist, keine Schadstoffe in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden, die einzelnen Stoffe, Zubereitungen oder Bauteile nach Anlage 4 ElektroG als identifizierbare und somit sortierbare Materialströme vorliegen, kann bei Batterien und Akkumulatoren von einer manuellen Demontage abgesehen werden und es können andere Verfahren eingesetzt werden, bei denen keine Zerstörung der Bauteile erfolgt. Sofern ein schonender mechanischer Grobaufbruch mit fest verbauten Akkumulatoren erfolgt, ist insbesondere darauf zu achten, dass die Akkumulatoren nicht beschädigt und vollständig über eine manuelle Sortierung entfernt werden. Batterien und Akkumulatoren sind so zu entfernen, dass sie nach der Entfernung identifizierbar sind.

### **Position AG und AK**

Nach Aussage von Batterieverwertern im Rahmen der Sitzung der AG „Schadstoffentfrachtung“ am 18.05.2017 ist eine Identifikation der chemischen Systeme von Batterien in fast allen Fällen möglich. Es sei nur eine Frage des Aufwandes, der hierzu notwendig sei.

Einige Erstbehandler gaben nach der letzten AK-Sitzung in ihrer schriftlichen Stellungnahme an, dass es zunehmend Geräte gibt, bei denen die Entnahme von Akkus und Batterien unter dem Aspekt der Arbeitssicherheit und dem Gesundheitsschutz der Mitarbeiter erschwert wird (z. B.

verklebte Akkus). Es sollte daher zulässig sein, solche Geräte entweder direkt in Prozesse des Batterierecyclings oder andere Prozesse zu verbringen. Solche Fälle sollen im Behandlungskonzept der Erstbehandlungsanlage beschrieben werden.

**Behandlungsanforderung 49:** Minimierung der Staubentwicklung bei Entladung und Behandlung von Geräten mit Tonern und Fotoleitertrommeln bzw. von Tonern und Fotoleitertrommeln selbst

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

**Behandlungsanforderung 50:** Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Tonerkartuschen, Farbtoner und Resttonerauffangbehälter

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde werden empfohlen.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 51:** Zuführung der geeigneten, vollständig erhaltenen und unbeschädigten Tonerkartuschen sowie der Tintenpatronen in Behandlungsanlagen für Vorbereitung zur Wiederverwendung

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Daten in Betriebstagebüchern dokumentiert. Es bestehen aber kaum Kontrollmöglichkeiten, ob das Potenzial der Vorbereitung zur Wiederverwendung ausgenutzt wurde. Hierzu müssten die Kartuschen und Patronen überprüft und mit der Absatz- bzw. Angebotssituation abgeglichen werden.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

### Bestehender Rechtsrahmen

Tonerkartuschen sowie Cadmium- oder Selen-haltige Fotoleitertrommeln müssen nach Anlage 4 Nr. 1 d) bzw. o) ElektroG aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden.

## Status Quo

Einige Erstbehandler trennen die Drucker vor einer mechanischen Behandlung vom Reststrom ab, da eine sorgsame Entfernung der Toner aufgrund der vorherrschenden Explosionsgefahr in der Anlage durch das Pulver wichtig sei. In der Regel werden Tonerkartuschen danach manuell aus den Geräten entnommen. Eine Entfrachtung bei beschädigten Geräten ist meistens nicht mehr möglich, da der Verschmutzungsgrad oftmals keine Entfrachtung erlaubt. Drucker werden in der Sammelstelle teilweise umgedreht in den Container gelagert, so dass hier die Gefahr besteht, dass der Toner herausfällt. Kleinere Drucker aus dem Privathaushalt werden somit meistens so stark beschädigt angeliefert (zerdrückt), dass keine Schadstoffentfrachtung mehr durchgeführt wird. Zudem werden tonerhaltige Geräte (v. a. Drucker) bei der Anlieferung teilweise so abgekippt, dass Geräte zerstört werden und Toner austritt. Eine Behandlung erfolgt teilweise mit Emissionen von Tonerstaub. Bei großen Bürogeräten wird der Toner manuell entnommen. Die Toner werden zur weiteren Behandlung in spezialisierten Behandlungsanlagen gegeben.

## Mengenpotenzial

Der Bundesdeutsche Arbeitskreis für Umweltbewusstes Management (B.A.U.M. e. V.) schätzt die Anzahl der jährlich in Deutschland verkauften Druckerpatronen auf 55 Mio. Stück und die der Tonerkartuschen auf 8 Mio. Stück. Der Marktanteil rezyklierter Druckerpatronen und Tonerkartuschen beträgt circa 12 %, was circa 13 Mio. Druckerpatronen und 2,5 Mio. Tonerkartuschen entspricht. Dementsprechend werden fast 90 % aller Druckerpatronen und Tonerkartuschen mit dem Restmüll entsorgt [125]. Anhand des Durchschnittsgewichts von 1 kg pro Tonerkartusche [126] ergibt das etwa eine Masse von 5500 t alleine an Tonerkartuschen, die jährlich entsorgt werden. Andererseits werden Tonerabfälle in der Abfallstatistik der Bundesländer unter den AVV-Nummern 080317 und 080318 geführt, sodass laut Destatis in Deutschland etwa 3200 t Abfälle im Jahr 2015 mit diesen AVV-Nummern entsorgt wurden. Explizite Zahlen, wie viele Toner in Altgeräten eine Erstbehandlungsanlage erreichen, liegen nicht vor.

Die Materialzusammensetzung von Tonerkartuschen wird von URT Umwelt- und Recyclingtechnik GmbH mit 41 Gew.-% Eisen, 37 Gew.-% PS-Kunststoff, 6 Gew.-% Tonerpulver und 3,5 Gew.-% Aluminium angegeben [127]. Der Fachbericht Swico gibt einen Materialmix von 44 Gew.-% Kunststoffe, 31 Gew.-% Eisen, 10 Gew.-% Nichteisen und 15 Gew.-% Pulver an [128].

## Ökologische Aspekte/Motivation

Trockentoner besteht aus 5-30 µm großen Teilchen und verhält sich ähnlich einer Flüssigkeit. Toner können flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (VOC) wie Benzol, Styrol, Phenol und Toluol sowie Schwermetalle, Organozinnverbindungen und Azofarbstoffe beinhalten [125], aber auch Ethylbenzol, Xylol, Aldehyde, Ketone und unterschiedliche Karbonsäuren als VOCs [129]. Für gewöhnlich bestehen Toner aus 90 % Harz und 5 % farbgebendes Pigment. Die übrigen Anteile machen überwiegend Hilfsstoffe wie Wachse, Eisenoxid oder ladungssteuernde und hitzebeständige Mittel aus. Als Farbpigmente werden meistens Triphenylmethanpigmente, Perylene oder Azopigmente verwendet [129].

Tonerstaub mit einer durchschnittlichen Größe von 7 µm liegt in der Größenordnung von Feinstaub. Feinstaub ist teilweise alveolengängig [129].

Die Hersteller schließen in ihren Sicherheitsdatenblättern gesundheitsschädigende Effekte auf die Atemwege, die Augen und die Haut nicht aus. Es wird vor Hautkontakt und Einatmung gewarnt [130].

Eine Minimierung der Staubentwicklung bei der Entladung und Behandlung ist aus Arbeitsschutzgründen, zur Verhinderung von Staubverpuffungen und von Kontaminationen anderer Fraktionen geboten.

Eine stoffliche Verwertung von Tonerkartuschen ist technisch möglich und entsprechende Anlagentechnik ist verfügbar. Die Wiederverwendung nach Vorbereitung zur Wiederverwendung führt dazu, dass die Kunststoffe und ggf. die in den Kartuschen und Tintenpatronen enthaltenen metallischen Teile und elektronischen Komponenten ohne aufwendige Recyclingprozesse wieder genutzt werden können und die Primärproduktion von Kartuschen und Patronen vermieden wird. Die ökologischen Effekte dieser Behandlungsanforderung resultieren im Wesentlichen aus dem inhärenten Treibhauspotenzial der Kunststoffe, die in den Kartuschen und Patronen enthalten sind.

### **Ökonomische Aspekte**

Tonergehäuse/-kartuschen sind wiederverwendbar, denn sie lassen sich wiederbefüllen und erneut nutzen. Entsprechend den Aussagen von Erstbehandlern während der Sitzung der AG Schadstoffentfrachtung am 18.05.2017 decken die Erlöse für solche Kartuschen und Patronen den Separationsaufwand ab.

Eine schonende Entladung muss unter anderem so erfolgen, dass die Tonerbehälter vor der mechanischen Behandlung entnommen werden können und nicht zerstört werden. Ein Abgleiten der Geräte aus dem Container ist schonender, als das Abkippen aus dem Container mit hoher Fallhöhe der Geräte. Der Entladeaufwand ist dadurch höher. Gegebenenfalls müssen bei fehlenden Freiflächen Einrichtungen aufgestellt werden, auf die die Geräte entladen werden können (z. B. Förderbänder). Zu berücksichtigen ist, dass die schonende Entladung toner- und fotoleitertrommelhaltiger Geräte eine wesentliche Voraussetzung für die Separation des Toners vor der mechanischen Behandlung ist. Vor diesem Hintergrund ist die Empfehlung zur Behandlungsanforderung als Operationalisierung bestehender rechtlicher Anforderungen zu verstehen (Anlage 4, Abs. 1, Pkt. d) ElektroG). In diesem Sinne entsteht durch die Empfehlung zur Behandlungsanforderung kein Zusatzaufwand.

Wird zusätzlich der Resttonerbehälter zu der bereits bestehenden Entnahme der Tonerkartuschen und Farbtoner separiert, so ergibt sich ein vergleichsweise geringer Zusatzaufwand, da die Einbauvarianten der Resttonerboxen in der Regel so gewählt sind, dass sie (in der Nutzungsphase) mit geringem Aufwand ausgewechselt werden können. Insofern entsteht durch die Empfehlung zur Separation von Tonerkartuschen und Resttonerbehältern kein wesentlicher zusätzlicher Aufwand im Vergleich zur Erfüllung bestehender rechtlicher Anforderungen. Zudem ist aus Arbeitsschutzgründen eine Minimierung der Staubentwicklung bei der Behandlung ebenso geboten wie eine Separation der Tonerboxen vor der mechanischen Aufbereitung und somit eine Entladung, die eine solche Separation nicht erschwert.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Angaben diesbezüglich vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die Technischen Vorschriften zur Entsorgung von EAG in der Schweiz führen aus, dass Tonerkassetten unter Einhaltung der geltenden Arbeitssicherheitsvorschriften entfernt und einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden müssen. Beim Umgang mit Tonerkassetten ist die Gefahr von Staubexplosionen zu beachten.

LAGA M 31 B gibt an, dass für Tonerkartuschen und Farbtoner aus gegenwärtiger Sicht eine manuelle Demontage erforderlich ist. Bei Großdruckern und Kopiergeräten müssen Toner vor

der weiteren Behandlung ausgebaut werden. Tonerkartuschen enthalten diverse VOC, teilweise auch Benzol und ggf. Lösungsmittel. Von austretenden Stoffen können somit Gesundheitsgefahren ausgehen. Daher ist eine Staubentwicklung zu vermeiden. Durch die Entnahme vor der mechanischen Aufbereitung wird eine Verschleppung der genannten Stoffe in andere Fraktionen unterbunden. Außerdem können beschädigte Tonerkartuschen Brände auslösen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des sorgfältigen Umgangs mit Geräten mit Tonerkartuschen sowie mit den Tonerkartuschen selbst.

### Position AG und AK

Der Behandlungsanforderung 49 wurde unter dem Vorbehalt auf dem 2. AG Treffen der AG 5 am 18.05.2017 zugestimmt, insofern vorher eine ordnungsgemäße Beladung des Containers stattfindet.

Die Behandlungsanforderung 50 und die Behandlungsanforderung 51 fanden Zustimmung auf dem 2. AG Treffen der AG 5 am 18.05.2017.

### Behandlungsanforderung 52: Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Cadmium- oder Selen-haltigen Fotoleitertrommeln

#### Adressat:

EBA

#### Monitoring:

Vor-Ort-Kontrollen

#### Ökonomischer Aufwand für Behandler:

Gering

#### Ökologischer Aspekt:

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Cadmium- oder Selen-haltige Fotoleitertrommeln müssen gemäß Anlage 4 Nr. 1 o) ElektroG aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden.

### Status Quo

Cadmium- oder Selen-haltige Fotoleitertrommeln werden bei Identifizierung während der Erstbehandlung aus separat erfassten Geräten ausgebaut. Sie sind anhand ihrer charakteristischen Färbung zu erkennen. Selenbeschichtete Fotoleitertrommeln besitzen eine silbergrau glänzende Oberfläche. Zudem haben sie einen größeren Durchmesser und eine zur Stirnseite geöffnete Walzenform [131].

### Mengenpotenzial

Sie kommen in alten Druckern, Kopierern und Faxgeräten (insbesondere bis Anfang der 90er Jahre) vor. Es liegt keine Mengenrelevanz für EAG aus der Sammlung beim öRE oder über die Verreiber vor, da mittlerweile die Großkopierer gemietet werden.

### Ökologische Aspekte/Motivation

Cadmium- oder Selen-haltige Fotoleitertrommeln können aus anorganischen Fotoleitern (z. B. Cadmiumsulfid, Arsenselenid, Galliumarsenid, amorphes Selen) bestehen. Selen ist ein festes, dunkelgraues, geruchsloses Halbmetall, das beim Verschlucken und beim Einatmen giftig wirkt. Es kann Organe bei längerer oder wiederholter Exposition schädigen. Selen kann Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung schädigen und ist somit wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 2). Cadmium wirkt karzinogen, reproduktionstoxisch und mutagen.

Es weist eine akute und chronische Toxizität auf. Außerdem ist Cadmium wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 1) und ist sehr giftig für Wasserorganismen. Durch die empfohlene Behandlungsanforderung werden eine Verstaubung und Kontamination der anderen Fraktionen bzw. eine Schadstoffverschleppung vermieden.

### Ökonomische Aspekte

Da die Separation bereits nach ElektroG verpflichtend ist, stellt die Empfehlung zur Behandlungsanforderung eine Konkretisierung der bestehenden Rechtslage dar und es entsteht durch die Empfehlung zur Behandlung kein zusätzlicher Aufwand im Vergleich zur Erfüllung bestehender rechtlicher Anforderungen.

### CENELEC

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Angaben diesbezüglich vor.

Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien

Die Technischen Vorschriften zur Entsorgung von EAG in der Schweiz führen aus, dass Fotoleitertrommeln mit Selenarsenid- oder Cadmiumsulfid-Beschichtungen unter Einhaltung der geltenden Arbeitssicherheitsvorschriften entfernt und einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden müssen.

LAGA M 31 B gibt an, dass für cadmium- oder selenhaltige Fotoleitertrommeln aus gegenwärtiger Sicht eine manuelle Demontage erforderlich ist. Bei Großdruckern und Kopiergeräten müssen diese vor der weiteren Behandlung ausgebaut werden.

### Position AG und AK

Der Workshop Erstbehandler gab nach der letzten AK-Sitzung in seiner schriftlichen Stellungnahme an, dass Bauteile wie Cd- oder Se-haltige Fotoleitertrommeln nur noch selten und hauptsächlich in gewerblichen High-End-Anwendungen vorkommen.

**Behandlungsanforderung 53:** Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Geräten mit Keramikfasern (z. B. Herde/Kochfelder), sofern nicht aus einer Kennzeichnung sichtbar wird, dass es sich um nicht-kanzerogene Keramikfasern handelt und Entsorgung als separate Bauteilfraktion

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### Bestehender Rechtsrahmen

Bauteile, die feuerfeste Keramikfasern gemäß Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (ABl. L 353 vom 31.12.2008, S. 1), die zuletzt durch die Verordnung (EU) Nr. 286/2011 (ABl. L 83 vom 30.3.2011, S. 1) geändert worden ist, enthalten, müssen gemäß Anlage 4 Nr. 1 I) ElektroG aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden.

## Status Quo

Werden feuerfeste Keramikteile in Geräten identifiziert, werden diese Geräte einer Schadstoffentfrachtung unterzogen. Gesundheitsschädliche Keramikfasern werden nicht mehr in Geräten eingesetzt. Sie wurden durch andere isolierende Werkstoffe substituiert. Eine Unterscheidung setzt die Erfahrung des Personals voraus.

## Mengenpotenzial

Feuerfeste Keramiken können z. B. in Kochfeldern (z. B. Cerankochfelder), automatischen Ausgabegeräten, Radiatoren, sonstigen Wärmeüberträgern, bei denen andere Flüssigkeiten als Wasser für die Wärmeübertragung verwendet werden, Bügeleisen und sonstigen Geräten zum Bügeln, Mangeln oder zur sonstigen Pflege von Kleidung, Fritteusen, Heizgeräten, Herden, Backöfen, Mikrowellengeräten, sonstigen Großgeräte zum Beheizen von Räumen, Betten und Sitzmöbeln, sonstigen Großgeräten zum Kochen oder zur sonstigen Verarbeitung von Lebensmitteln, sonstigen Überwachungs- und Kontrollinstrumenten von Industrieanlagen (z. B. in Bedienpulten), Toastern, Werkzeugen - Schweiß- und Lötwerkzeugen oder Werkzeugen für ähnliche Verwendungszwecke enthalten sein. Ob es sich dabei in jedem Fall um kanzerogene Keramikfasern handelt, ist unklar. Eine systematische Datengrundlage für die Verwendung kanzerogener Keramikfasern in Elektro- und Elektronikgeräten liegt nicht vor.

Im Rahmen einer Marktrecherche und eines Feldversuchs im Jahr 2014 zum Recycling von Kochmulden mit Glaskeramik (die nicht notwendigerweise in jedem Fall die keramischen Mineralfasern enthalten müssen) hat das Witzenhausen-Institut in Untersuchungen bei fünf verschiedenen Städten und Landkreisen festgestellt, dass Kochmulden mit Glaskeramik an kommunalen Rücknahmestellen in geringen Mengen ankommen. Eine Hochrechnung ergab eine Menge von ca. 200.000 bis 300.000 Kochmulden mit Glaskeramik, welche pro Jahr über die Gruppe Haushaltsgroßgeräte entsorgt werden. Für alle Entsorgungswege wird eine jährliche Anzahl von bis zu 900.000 Kochmulden mit Glaskeramik geschätzt [132].

## Ökologische Aspekte/Motivation

Hinsichtlich der gesundheitlich relevanten Eigenschaften ist zu berücksichtigen, dass die Löslichkeit im Körper deutlich geringer ist, als bei anderen glasartigen Fasern. Vor allem gealterte Keramikfasern haben recht hohe Anteile sehr langer und dünner Fasern (Durchmesser < 1 µm) [133]. Die Einstufung von Mineralfasern nach EU 1272/2008 CLP-VO erfolgte für Keramikfaser in die Kategorie 1B (Stoffe, die wahrscheinlich beim Menschen karzinogen sind; die Einstufung erfolgte überwiegend aufgrund von Nachweisen bei Tieren).

Das RAL-Gütezeichen beruht auf toxikologischen Bewertungen der Biobeständigkeit. Es wird für biolösliche Mineralwollen vergeben, die anhand von Tierversuchen als nicht krebserzeugend eingestuft sind. Seit Juni 2000 sind in Deutschland nur noch Mineralwolle-Dämmstoffe mit RAL-Siegel auf dem Markt. Das In-Verkehr-Bringen und Verwenden aller anderen Mineralwolle-Dämmstoffe zum Zwecke des Schall- und Wärmeschutzes ist verboten. Ob dies auch für Elektrogeräte zutrifft, ist nicht bekannt.

Bei Produkten ohne RAL-Gütezeichen muss die Emission von Faserstäuben bei der Verarbeitung soweit wie technisch möglich verringert werden (TRGS 521). Bei Produkten mit RAL-Gütezeichen müssen Emissionen von Faserstäuben bei der Verarbeitung generell verringert werden. Die Fasern sind jedoch nicht krebserzeugend, daher sind lediglich allgemeine Mindestmaßnahmen zum Schutz vor Stäuben notwendig (TRGS 500).

Laut dem Sachverständigen-Gutachten sind Geräte, die feuerfeste Keramikfasern enthalten, aus Gründen des Mitarbeiterschutzes nie mechanisch zu öffnen [9].

Die empfohlene Behandlungsanforderung führt zu einer Vermeidung von Schadstoffverschleppungen in andere Fraktionen.

Die feuerfesten Keramikfasern für besondere Anwendungen wirken bei bestimmten Fasergeometrien karzinogen und hautirritierend. Sie beinhalten Alkali- oder Erdalkalimetalle (Erdalkalisilikatwolle) bzw. auch Aluminiumsilikatwolle.

### **Ökonomische Aspekte**

Da die Separation bereits für Erstbehandler verpflichtend ist und Arbeitsschutzanforderungen (Verstaubung bei der mechanischen Behandlung) und Verhinderung von Schadstoffverschleppungen gegeben sind, stellt die Empfehlung zur Behandlung keinen zusätzlichen Aufwand im Vergleich zur Erfüllung bestehender rechtlicher Anforderungen dar.

### **Weiterer Regelungsbedarf**

Eine Identifikation der entsprechenden Geräte ist derzeit nicht möglich, da keine Kennzeichnung und keine zuverlässige Datengrundlage für eine gerätebezogene Identifikation vorhanden sind (z. B. nur Geräte, die vor dem Jahr xy in Verkehr gebracht wurden, nur Geräte der Typen/Marken/Funktionen ...). Um die rechtlichen Anforderungen vollumfänglich zu erfüllen, müssten daher alle Geräte untersucht werden. Die Schaffung einer belastbaren Grundlage zur Identifikation der relevanten Geräte wird als wesentlich angesehen, weshalb im Kapitel 4.7.3 eine Mitteilungspflicht vorgeschlagen wird.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Angaben diesbezüglich vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

LAGA M 31 B gibt an, dass für Bauteile, die feuerfeste Keramikfasern enthalten, aus gegenwärtiger Sicht eine manuelle Demontage erforderlich ist. Bei Altgeräten, die vor dem 01.06.2000 in Verkehr gebracht wurden, ist von einer krebserzeugenden Eigenschaft auszugehen (kann beim Einatmen Krebs erzeugen).

### **Position AG und AK**

Es wurde bei der AG-Sitzung zur Schadstoffentfrachtung am 18.05.2017 angemerkt, dass es ein phase-out kanzerogener Keramikfasern gegeben hat. Als Datum wurde für die Hersteller in Deutschland das Jahr 2005 vermutet. Eine abgesicherte Grundlage liegt jedoch nicht vor.

**Behandlungsanforderung 54:** Zerstörungsfreie Separation von mindestens der PCB- und Elektrolytkondensatoren während der Behandlung, sodass keine Flüssigkeiten austreten

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Vor-Ort-Kontrollen

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**Behandlungsanforderung 55:** Grenzwert von 50 mg PCB / kg der feinsten nichtmetallischen Restfraktion und der Staubfraktion; Bei Überschreitung von 50 mg PCB pro kg Staub ist im Behandlungskonzept zu dokumentieren, wie Kondensatoren ordnungsgemäß separiert werden

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Kontrolle der PCB-Konzentration, die regelmäßig bzw. im Falle der Änderung des Anlageninputs geprüft werden sollte; ist im Rahmen der Entsorgung der feinsten nichtmetallischen Restfraktion bereits üblich; Überprüfung, ob die Ursachen einer Grenzwertüberschreitung effektiv gesucht wurden und entsprechende Maßnahmen ergriffen wurden sind durch Sachverständige bei der Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder durch die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde zu kontrollieren.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**CENELEC:**

modifizierte Übernahme aus TS 50625-3-1

**Behandlungsanforderung 56:** Separation von Kondensatoren:

mindestens 1,3 kg / t behandelter Großgeräte (Kategorie 4 ohne Photovoltaikmodule)

mindestens 0,9 kg / t behandelter Kleingeräte (Kategorie 5 ohne Photovoltaikmodule und Kategorie 6 kleine IT- und Telekommunikationsgeräte)

mindestens 1,0 kg / t behandelter CRT-Bildschirmgeräte

mindestens 0,08 kg / t behandelter Kühl- und Tiefkühlgeräte

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Daten sind in Betriebstagebüchern dokumentiert; bei Unterschreitung ordnet die Überwachungsbehörde eine Überprüfung durch den Betrieb an und bei wiederholter Unterschreitung ist ein Optimierungskonzept der Kondensatorseparation zu verlangen

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

**CENELEC:**

1:1 Übernahme aus TS 50625-3-1

### Bestehender Rechtsrahmen

Elektrolytkondensatoren, die bedenkliche Stoffe enthalten (Höhe größer als 25 mm, Durchmesser größer als 25 mm oder proportional ähnliches Volumen), müssen gemäß Anlage 4 Nr. 1 n) ElektroG aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden. Für PCB-Kondensatoren gilt gemäß Anlage 4 Nr. 3 ElektroG § 2 Absatz 2 Nr. 2 der PCBAbfallV.

Auch wenn 1978 in Deutschland ein PCB-Verwendungsverbot in „offenen Systemen“ wie z. B. als Dichtungsmassen erteilt wurde, kamen weiterhin erhebliche Mengen in Transformatoren und Kondensatoren zum Einsatz. Nachdem seit 1983 in Deutschland keine PCBs mehr produziert wurden, wurden auch keine elektrotechnischen Produkte mit einer PCB-haltiger Füllung in Verkehr gebracht [134]. Im Jahr 1993 wurde in die ChemVerbots-VO die 1989 verabschiedete PCB-Verbotsverordnung integriert. Danach ist grundsätzlich die Verwendung von Erzeugnissen verboten, die Zubereitungen mit einem PCB-Gehalt von mehr als 50 mg/kg enthalten. Seit dem 1. Januar 2000 gilt ein endgültiges Verbot für das Betreiben von Geräten, die über einen Liter PCB-haltige Flüssigkeit enthalten, wobei Ausnahmeregelungen bis 2010 dargelegt werden. Die Verbote bei Kondensatoren und Transformatoren traten zeitlich gestaffelt in Kraft. Hierzu wird in Tabelle 32 eine Übersicht gegeben [134].

**Tabelle 32: Rechtliche Regelungen für Kondensatoren und Transformatoren in Bezug auf PCB [134]**

PCB-haltiges Bauteil	Zeitpunkt des Verbotes
In Verkehr bringen von Kleinkondensatoren (< 1 l PCB)	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwendung von Kleinkondensatoren 0,1 bis 1 l	Verbot seit dem 1. Januar 2011
Verwendung von Kleinkondensatoren < 0,1 l	Bis zur Außerbetriebnahme, sofern vor dem 29. Juli 1989 schon in Betrieb
In Verkehr bringen von Großkondensatoren (< 1 l PCB)	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwenden von Großkondensatoren (< 1 l PCB)	Verbot seit dem 1. Januar 1994
In Verkehr bringen von Transformatoren	Verbot seit dem 29. Juli 1989
Verwenden von Transformatoren	Verbot seit dem 1. Januar 2000 IT&T-Geräte (exkl. Bildschirmgeräte)

### Status Quo

Große Elektrolytkondensatoren werden separiert und getrennt einer Verwertung zugeführt. Nach unserem Kenntnisstand werden kleine Elektrolytkondensatoren zumeist nicht von Leiterplatten der Klasse 1 oder 2 entfernt, denn eine gezielte Entstückung findet in dem Fall nicht statt. Leiterplatten der Klasse 3 werden bei einem Folgebehandler entfernt.

Werden PCB-Kondensatoren in EAG erkannt, werden diese bei der Erstbehandlung ordnungsgemäß vor der mechanischen Behandlung manuell demontiert und entsprechend der Vorgaben einer ordnungsgemäßen Beseitigung zugeführt.

Da kleine Kondensatoren bis zur Außerbetriebnahme ohne zeitliche Befristung weiter genutzt werden dürfen, ist damit zu rechnen, dass entsprechende Kondensatoren in den nächsten Jahren dem Entsorgungsprozess zugeführt werden. Teilweise werden weiterhin Kondensatoren mit einer PCB-Füllung von über 1 Liter sowohl von deutschen als auch ausländischen Betreibern bei den Entsorgungsfachbetrieben angeliefert. Übergangsfristen und Altbestände sind weiterhin Ursachen für zu erwartende Mengen PCB-haltiger Bauteile im Abfallstrom [134].

## Mengenpotenzial

Für die Gerätearten Leuchten für Leuchtstofflampen, Ölbrenner, Trockenhauben und Dunstabzugshauben liegt laut einer Untersuchung zu PCB-Anwendungen ein hohes Gefahrenpotenzial vor. Waschmaschinen und Geschirrspüler weisen ein geringes Schadstoffpotenzial auf [131]. Chemsuisse hat 2011 eine detaillierte Liste von Kondensatoren nach Herstellern erstellt, die zur Identifikation der PCB-haltigen Kondensatoren unterstützen kann. Nach dieser Liste sind alle PCB-haltigen Kondensatoren vor oder spätestens im Jahr 1988 in Verkehr gebracht worden [135].

Üblicherweise weisen Altgeräte mit langer Nutzungsdauer (z. B. die Verdachtsgruppen Haushaltsgroßgeräte und Leuchten mit Gasentladungslampen) ein durchschnittliches Alter von deutlich unter 30 Jahren auf [123]. In Ausnahmefällen kann es jedoch, z. B. aus dem Rückbau oder der Sanierung von Gebäuden, solche Fälle geben (z. B. aus Deckenleuchten).

Die Rückmeldung eines Teilnehmers der AG 5 ergab, dass sich folgende Mengen an Kondensatoren in B2C-EAG der jeweiligen Sammelgruppen befinden: 1,15 kg/t in Haushaltsgroßgeräten, 0,5 kg/t in Kühlgeräten, 1,17 kg/t in Bildschirmen und 1,2 kg/t in Kleingeräten. Nach den 10 Kategorien aufgeschlüsselt wurden folgende Mengen über die Eigenrücknahme erreicht: 3,00 kg/t der Kategorie 1, 2,00 kg/t der Kategorie 2, 2,75 kg/t der Kategorie 3, 2,50 kg/t der Kategorie 4 und 3,00 kg/t der Kategorie 6.

PCB Kondensatoren kommen laut mündlicher Aussage auf dem 2. Treffen der AG 5 am 18.05.2017 von Herrn Beckmann nicht im Übermaße im Abfallstrom vor, dennoch sind sie als mengenrelevant einzustufen. Laut einer Untersuchung in Bremerhaven bei 4 Schrotthändlern im Jahr 2012 wurden 1.200 Kondensatoren untersucht. Hierbei wurden 52 % als PCB frei, 27 % als PCB-haltig und der Rest als nicht erkennbar identifiziert. Teilweise stammten diese aus Weißer Waren und Gebäude-E-Technik. In den meisten Fällen waren die Quellen aber unklar.

## Ökologische Aspekte/Motivation

Anorganische und organische Säuren mit verschiedenen Lösemitteln und Korrosionsschutz-Additiven sind Bestandteile von Elektrolytkondensatoren. Diese enthalten damit gegebenenfalls wassergefährdende Stoffe [7].

Es existieren bestimmte Elektrolytkondensatoren, die Tantal beinhalten. Tantal wurde als ressourcenrelevantes Metall eingestuft. Viele tantalhaltige Elektrolytkondensatoren sind anhand ihrer gelben Markierung von anderen Elektrolytkondensatoren optisch unterscheidbar.

In einigen Elektrolytkondensatoren ist Niob enthalten.

PCB sind organische Chlorverbindungen, von denen akute und chronische Gesundheitsgefahren ausgehen. PCB wirken kanzerogen, mutagen (Keimzellen) und reproduktionstoxisch. PCB wirken akut und chronisch, stark mit langfristiger Wirkung wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 3). PCB sind in der Dirty Dozen Liste aufgeführt und seit 2001 durch die Stockholmer Konvention weltweit verboten.

Aus Gründen des Arbeiterschutzes und der potenziellen Verunreinigung von Fraktionen sollten Geräte, die Kondensatoren mit PCB enthalten, nicht vor der Entfrachtung mechanisch geöffnet werden. Mit der empfohlenen Behandlungsanforderung wird eine Verschleppung der Stoffe vermieden.

Bereits bei einer geringen gebrauchstypischen Erwärmung wie bei überhitzten Kondensatoren oder beim Shreddern PCB-kontaminierter Metallfraktionen können PCDD und PCDF (polychlorierte Dibenzodioxine und -furane) freigesetzt werden [131].

In einer umfangreichen Untersuchung im Umfeld von drei Recyclingbetrieben wurden von Juli 2013 bis Juli 2014 die Staubniederschläge und die Schwermetalleinträge aus überwiegend diffusen Emissionsquellen ermittelt. Auch wenn der Einsatz von PCB gesetzlich weitgehend eingeschränkt ist, konnten dennoch Anreicherungen in Graskulturen in unmittelbarer Nähe der Anlagen festgestellt werden. Es ist anzunehmen, dass PCB immer noch über Betriebsprozesse des Altgeräterecyclings in die Umwelt ausgetragen wird [64].

### **Ökonomische Aspekte**

Mit der Behandlungsanforderung 54 wird die Definition „zerstörungsfrei“ dahingehend konkretisiert, dass während und nach der mechanischen Behandlung keine Flüssigkeiten aus den Kondensatoren austreten dürfen. Ein Zusatzaufwand durch die Empfehlung zur Behandlungsanforderung 54 im Vergleich zur Erfüllung der rechtlichen Vorgaben erfolgt nicht.

Die POP-VO verlangt explizit eine Separation POP-haltiger Abfälle von anderen Abfällen. Insofern handelt es sich bei der Behandlungsanforderung 55 weitestgehend um eine Operationalisierung bestehender rechtlicher Anforderungen. Zusatzaufwendungen sind dahingehend abzuschätzen, dass für eine Analyse 150 bis 250 € veranschlagt werden können.

Die Behandlungsanforderung 56 stellt eine Operationalisierung des bestehenden rechtlichen Rahmens dar und verursacht keine Zusatzkosten.

### **CENELEC**

In der CENELEC EN 50625-1 wird zur Identifizierung von PCB-Kondensatoren angeführt, dass Kondensatoren keine PCB-Kondensatoren sind, wenn sie nach 1986 bzw. die Elektrogeräte nach 1987 produziert wurden und sie als frei von PCB deklariert sind.

Der Grenzwert der Behandlungsanforderung 55 von 50 mg PCB/kg der feinsten nichtmetallischen Restfraktion stammt aus CENELEC TS 50625-3-1.

Die Zielwerte zur Separation von Kondensatoren der Behandlungsanforderung 56 stammen aus CENELEC TS 50625-3-1. Entsprechend den Aussagen von Erstbehandlern während der Sitzung der AG Schadstoffentfrachtung am 18.05.2017 werden die Zielwerte üblicherweise erreicht, wenn eine zuverlässige Kondensatorseparation in der EBA erfolgt. Durch die Heterogenität der Anlieferungen bei den EBA kann es zu Unterschreitungen des Wertes trotz effektiver Kondensatorseparation kommen. Es wird daher bei Unterschreitung in einem Berichtsjahr empfohlen, eine Überprüfung durch den Betrieb im Rahmen des Behandlungskonzeptes zu fordern und bei wiederholter Unterschreitung in Folge ein Optimierungskonzept der Kondensatorseparation zu verlangen.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Andere Staaten geben nach unserem Kenntnisstand keine Angaben diesbezüglich vor.

### **Position AG und AK**

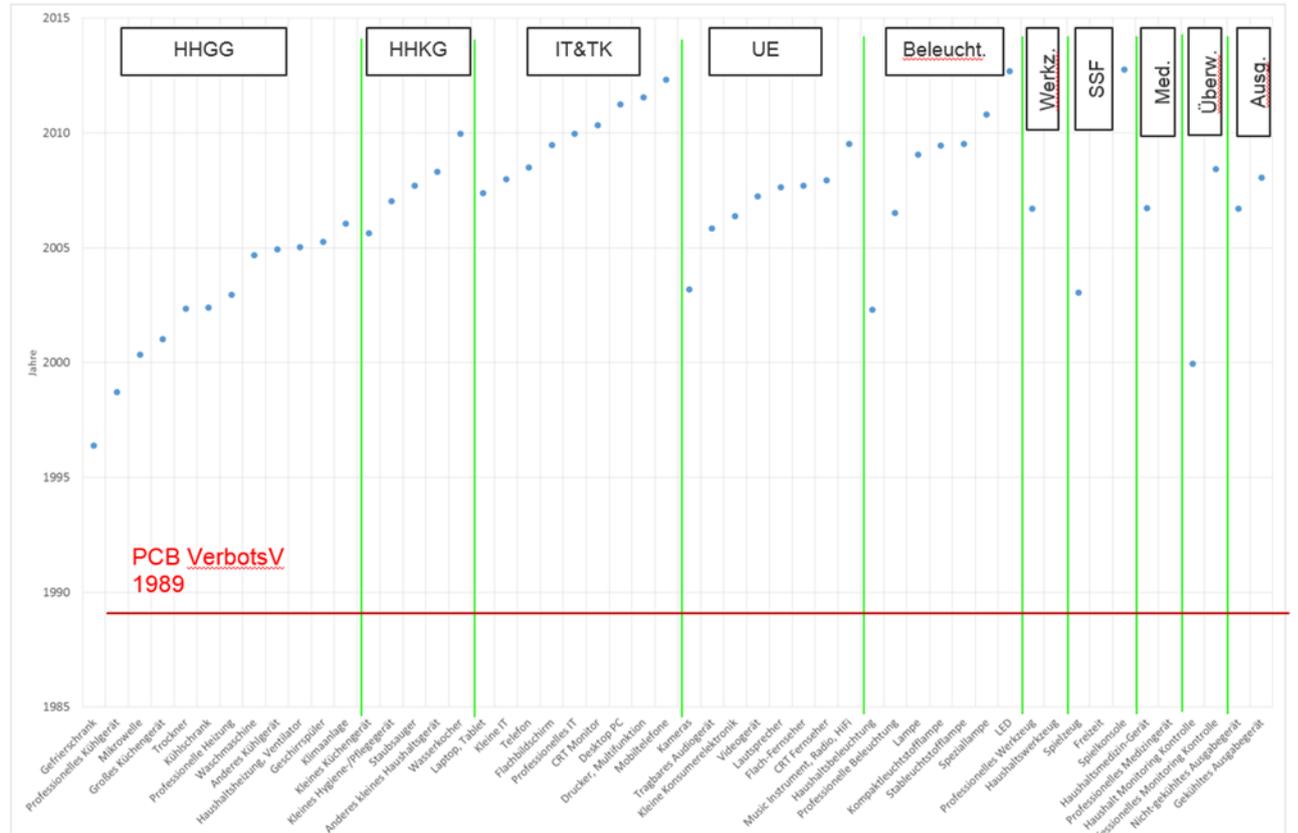
Die Akteure merken an, dass der Grenzwert von 50 mg/kg in der Behandlungsanforderung 55 nicht immer eingehalten werden kann und sprechen sich daher ausdrücklich für ein Behandlungskonzept aus, indem die Überschreitungen des Grenzwertes plausibel dargelegt werden sollen. PCB kann neben Kondensatoren in anderen Materialien enthalten sein (entsprechend den Angaben der Erstbehandler in der Sitzung der AG Schadstoffentfrachtung am 18.05.2017 auch in Anstrichen und Elastomeren), über die der Erstbehandler keine Kenntnisse hat.

Die Akteure bestätigten, dass die Zielwerte zur Separation von Kondensatoren in der Behandlungsanforderung 56 erreicht werden können.

### Spezifische Begründungen

Die Abbildung 20 stellt dar, in welchem Jahr verschiedene Gerätearten mit potenziell PCB-haltigen Bauteilen in Verkehr gebracht wurden, die 2017 als Altgeräte anfallen [10]. Dazu wurde die durchschnittliche Nutzungsdauer nach Balde et al. genutzt [123]. Aufgetragen ist zudem das Jahr der Beschränkung von PCB durch die PCB-Verbotsverordnung. Deutlich wird, dass Altgeräte mit durchschnittlichen Verbleibsdauern in der Nutzungsphase erwartungsgemäß kein PCB mehr enthalten.

**Abbildung 20: In-Verkehr-Bringung und Entsorgung von PCB-haltigen Geräten mit durchschnittlicher Nutzungsdauer nach [123]**



### **Behandlungsanforderung 57: Verpflichtende Separation vor einer mechanischen (Grob-) Zerkleinerung von Berylliumoxid-haltigen Bauteilen aus gewerblichen Geräten**

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Daten sind in Betriebstagebüchern dokumentiert; schlüssiges Behandlungskonzept erstellen, da bisher zu wenig Informationen vorliegen; Mitteilung der separierten EAG mit BeO-haltigen Bauteilen und deren Mengen im Fragebogen (siehe Kapitel 4.7.3)

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

nicht quantifizierbarer Zusatzaufwand für Separation; zudem Zusatzaufwand für die Informationsbeschaffung, soweit überhaupt verfügbar

**Ökologischer Aspekt:**

Hoch

### **Bestehender Rechtsrahmen**

Eine konkrete Vorgabe zur Separation von Berylliumoxid-haltigen Bauteilen besteht im ElektroG nicht.

### **Status Quo**

Die Erfassung Beryllium-haltiger EAG erfolgt in verschiedenen Sammelgruppen, je nach Geräteart (z. B. derzeit Sammelgruppe Haushaltsgroßgeräte oder Sammelgruppe IT). Berylliumbauteile werden bei Nichtdemontage vor der mechanischen Behandlung mit der NE-Fraktion ausgetragen, dort aber nicht separiert. Eine Behandlung in der Form, dass Berylliumlegierungen für die Rückgewinnung separiert werden, ist unwahrscheinlich und wird derzeit nicht praktiziert. Keramische Beryllium-Komponenten werden in der mechanischen Behandlung mit hoher Wahrscheinlichkeit zerkleinert und treten als Staub aus. Sind die Beryllium-Keramiken von Metall umschlossen, ist der Aufschluss von der Stabilität der Umschließung und dem Behandlungsprozess abhängig. Eine Separation keramischer Beryllium-Komponenten ist derzeit nach dem Stand der Technik nur manuell möglich.

Informationen zum Vorkommen von Berylliumoxid in EAG sind kaum verfügbar. Zwar besteht nach § 28 Abs. 1 ElektroG eine Informationspflicht, diese gilt jedoch nicht rückwirkend (bei Telekommunikationsanlagen handelt es sich teilweise um alte Altgeräte). Außerdem besteht das strukturelle Problem, dass solche Informationen (wenn überhaupt verfügbar) nur auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden und bei den Erstbehandlungsanlagen in vielen Fällen nicht bekannt sind, ob und welches Gerät Berylliumoxid enthält. Somit werden entsprechende Anfragen nicht gestellt.

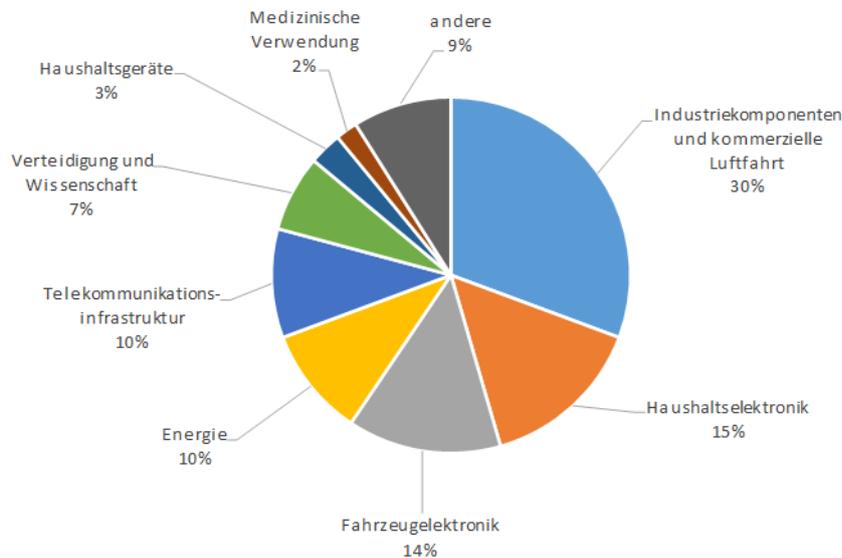
Bei dental-medizinischen Röntengeräten stellen sich besondere Anforderungen bei der Entsorgung des Röntgenstrahlers. Dieser befindet sich in einem bleiummantelten Kubus, der mit Öl gefüllt ist. Das Öl muss zunächst abgelassen werden. Anschließend ist die Kathodenstrahlröhre vorsichtig zu entfernen, da diese über eine mit Beryllium beschichtete Glasröhre verfügt. Diese muss separat und bruch sicher gesammelt und entsorgt werden.

### **Mengenpotenzial**

Weltweit wurden etwa 288 t Beryllium im Jahr 2014 produziert. Davon waren knapp 30 t Berylliummetall mit einem Berylliumanteil von über 60 %, über 250 t Berylliumlegierungen mit einem Berylliumgehalt unter 60 % und 6 t Berylliumoxid-Keramiken [136]. Eine Übersicht über

die weltweite Verteilung des Verbrauchs über die verschiedenen Anwendungsfelder gibt die Abbildung 21 wieder [10].

**Abbildung 21: Anwendungsfelder von Beryllium [10]**



Die Hauptabnahmeländer der EU (Deutschland, Frankreich und Italien) verbrauchten ca. 30 t, Deutschland alleine etwa 22 t [136]. Knudson gibt an, dass 11,5 t Beryllium in Produkten enthalten sind, die in Elektro- und Elektronikgeräten in Europa verbraucht werden [137]. Metallisches Beryllium und Berylliummischungen (Berylliumgehalt > 60 %) werden in Europa in Mengen von 2-10 t pro Jahr verwendet, davon 0,2 t in elektrischen und elektronischen Geräten. Bei Berylliumlegierungen (Berylliumgehalt 0,15-2 %) liegt die Verwendungsmenge zwischen 50 und 55 t/a, von denen 25 bis 28 t/a in elektrischen und elektronischen Geräten verwendet werden [138]. Berylliumoxid wird in Europa nach Gensch et al. In Mengen von 2-3 t pro Jahr verwendet [138]. Knudson 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 wurden [137].

Nach Aussage eines AG-Teilnehmers reduziert sich die Berylliumoxid-Menge auf B2B Geräte, denn größere Mengen fallen in der Mobilfunktechnik und Röntgenanlagen an.

Als Verwendungsbereiche von Beryllium und Berylliumgemischen werden sehr spezifische langlebige Anwendungen im professionellen Bereich genannt. Berylliumlegierungen werden im Bereich der elektrischen und elektronischen Geräte in Steckverbindern und Kontaktfedern von Computern und der Telekommunikation, in Medizingeräten sowie in Membranen in Lautsprechern eingesetzt [139]. Auch als Federn und Steckverbindungen sowie als Relaisstechnik in Weißer Ware sowie in der Industrieelektronik und in der Telekommunikationsinfrastruktur wird es verwendet. Mögliche Anwendungskomponenten sind beispielsweise Batteriekontakte oder Koaxialsteckverbinder [140]. Knudson gibt an, dass der Gehalt von Beryllium in einem Handy bei 40 ppm liegt [137]. Beryllium-Keramiken (Berylliumoxid) finden Anwendung in Fahrzeugzündsystemen, Transmittern für Radiofrequenz-Anwendungen in Mobiltelefonen, Hochleistungsmikrowellentransmitter, Mobilfunk-Basisstationen, Radarsystemen, Zielsystemen von militärischen Verteidigungsanlagen [137] sowie in Wärmeleitpasten von Prozessoren und Transistoren in Elektronikgeräten [141]. Auch wird Berylliumoxid-Flies z. B. als Isolierungen auf Leiterplatten und in Laborgeräten bzw. medizinischen Geräten eingesetzt, wo hohe Spannungen

auftreten. Weiterhin wird es aufgrund seiner Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen als Beryllium-Fenster in Röntengeräten eingesetzt [131].

### **Ökologische Aspekte/Motivation**

Bei Beryllium besteht ein hohes Versorgungsrisiko und wurde daher als kritisches Material identifiziert.

Reine Berylliummetallkomponenten, die in technologischen Anwendungen verwendet werden, haben extrem lange Lebensdauern und kehren daher sehr langsam in den Abfallstrom zurück. Einige kehren aufgrund ihrer Anwendung im Weltraum oder beim Militärüberhaupt nicht zurück. Wenn reine Beryllium-Komponenten zurückkommen, können sie dann aber leicht recycelt werden. Die Produktionsabfälle werden beispielweise gesammelt und dem Recycling zugeführt. In allen Fällen führt das Recycling von Berylliummetall zu einer erheblichen Energieeinsparung von über 70 % im Vergleich zur Gewinnung von Beryllium aus Erz.

Die Rückgewinnung von Beryllium aus berylliumhaltigen Legierungen in EAG (z. B. die Kupfer-Beryllium-Komponenten in der End-of-Life-Elektronik) wird wegen der geringen Größe der Komponenten und des damit sehr niedrigen Berylliumgehalts pro Gerät (weniger als 40 ppm, sogar in Geräten mit dem höchsten Berylliumgehalt) nicht durchgeführt. Legierungen, die Beryllium enthalten, machen etwa 0,15 % aller in EAG verwendeten Kupferlegierungen aus, die mit anderen Kupferfraktionen gesammelt und anschließend im Kupferrecyclingstrom auf rund 2 ppm verdünnt werden. Damit werden Berylliumlegierungen mit nicht berylliumhaltigem Kupfer zusammen eingeschmolzen und die extrem kleinen Mengen Beryllium werden in die Schlacke überführt [136].

Beryllium (-oxid) wirkt akut toxisch bei Verschlucken (Kat. 3) und Einatmen (Kat. 1). Es ist krebserregend und besitzt bei einmaliger sowie wiederholter Exposition eine spezifische Zielorgan-Toxizität. Es verursacht Hautreizungen, Reizung der Atemwege und schwere Irritationen der Augen. Beryllium ist stark wassergefährdend (Wassergefährdungsklasse 3).

Bei einem mechanischen Aufschluss von Bauteilen mit Berylliumoxid-Inhalten kommt es aufgrund des keramischen Charakters von Berylliumoxid zu Staubemissionen. Es besteht eine hohe gesundheitliche Relevanz für die Mitarbeiter während der mechanischen Behandlung von Berylliumoxid-haltigen Bauteilen, daher ist die Behandlungsanforderung 57 in einer Behandlungsverordnung zu etablieren.

### **Ökonomische Aspekte**

Eine Datengrundlage zur Quantifizierung der Aufwände liegt nicht vor.

### **CENELEC**

Die CENELEC-Normen geben derzeit keine Angaben diesbezüglich vor.

### **Vorschriften anderer Staaten und weitere Richtlinien**

Die AbfallBPV in Österreich gibt an, dass berylliumoxidhaltige Bauteile vollständig aus EAG zu entfernen und ordnungsgemäß zu behandeln sind.

LAGA M 31 B führt aus, dass zur Verbesserung der stofflichen Verwertung unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer, arbeitsmedizinischer und arbeitshygienischer Gründe die Entfernung von elektronischen Bauteilen, die Berylliumoxid enthalten, sinnvoll ist.

### **Position AG und AK**

Einige Erstbehandler gaben nach der letzten AK-Sitzung in seiner schriftlichen Stellungnahme an, dass Berylliumoxid-haltige Bauteile selten und hauptsächlich in gewerblichen High-End-Anwendungen vorkommen.

## 4.6 AG 6 – Kühlgeräte

Entsprechend den Anforderungen der Anlage 4 Nr. 1 h) ElektroG müssen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKW), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) und Kohlenwasserstoffe (KW) aus getrennt gesammelten Altgeräten entfernt werden und die Gase nach Nr. 4 b) ordnungsgemäß entfernt und behandelt werden. Ozonschädigende Gase müssen gemäß geltenden Vorschriften (EG/1005/2009) behandelt werden.

Die erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002 regelt in den Nummern 5.4.8.10.3/5.4.8.11.3 bauliche und betriebliche Anforderungen an Anlagen zur Entsorgung von Kühlgeräten oder -einrichtungen, die FCKW enthalten.

Derzeit befindet sich die TA-Luft in der Überarbeitung, sodass erst bei Verabschiedung der Novellierung eine konkretisierende Überprüfung der Anforderungen für die Behandlung von Kühlgeräten und deren Inhaltstoffen stattfinden kann. Dann lässt sich prüfen, ob weitere über die TA-Luft hinausgehende Anforderungen aufgestellt werden müssen. Abschließend können dann auch CENELEC EN 50625-2-3 und TS 50625-3-4 bewertet und Inhalte in mögliche weitere Behandlungsanforderungen einbezogen werden. Dazu ist ein Folgebericht angedacht.

## 4.7 Übergreifende Empfehlungen

### 4.7.1 Monitoring

Das Monitoring zu den einzelnen Behandlungsanforderungen 1 bis 57 sieht in der Regel die Überprüfung des Regelungserfordernisses in den Betriebstagebüchern im Rahmen der betrieblichen Dokumentation oder im Rahmen von Vor-Ort-Kontrollen vor. Die Überprüfung sollte durch einen Sachverständigen mindestens bei der jährlichen Zertifizierung nach § 21 ElektroG oder die für die Anlage zuständige Aufsichtsbehörde bzw. Genehmigungsbehörde vollzogen werden.

#### Weiterer Regelungsbedarf

Da im Rahmen der Zertifizierung nach § 21 Abs. 3 ElektroG nur geprüft wird, ob die Anlage technisch geeignet ist, die Behandlungsanforderungen nach § 20 Abs. 2 ElektroG einzuhalten, nicht jedoch, ob sie diese auch tatsächlich einhält, ist für darüberhinausgehende Prüfungen der § 21 ElektroG anzupassen. Insbesondere sollte beispielsweise die Einhaltung der Grenz- und Zielwerte, die Zweckdienlichkeit und die Umsetzung des Behandlungskonzeptes im Rahmen der Zertifizierung überprüft werden.

### 4.7.2 Behandlungskonzept

**Behandlungskonzept:** Erstellen eines Behandlungskonzepts mit dem Ziel der Sicherstellung der ordnungsgemäßen EAG-Behandlung, insbesondere der Schadstoffentfrachtung und Wertstoffseparierung, sowie deren Verbesserung

**Adressat:**

EBA

**Monitoring:**

Prüfung der Zweckdienlichkeit und Wirksamkeit des Konzepts und seiner Umsetzung in der betrieblichen Praxis im Rahmen der EBA-Zertifizierung.

**Ökonomischer Aufwand für Behandler:**

Gering (für EBA mit Efb- oder CENELEC-Zertifizierung) bis mittel

**Ökologischer Aspekt:**

Mittel

Die Pflicht zur Erstellung eines Behandlungskonzepts durch die Erstbehandler dient der Sicherstellung geeigneter und ordnungsgemäßer Behandlungsmaßnahmen in den Erstbehandlungsanlagen. Die Integration einer Pflicht zur Erstellung eines Behandlungskonzepts in die Behandlungsverordnung war der explizite Wunsch einiger AG-Teilnehmer. So sollen vergleichbare Behandlungsstandards sichergestellt und Ursachen im Falle von Grenzwertüberschreitungen bestimmt werden können. Die geforderte Dokumentation entspricht weitgehend der in LAGA-Mitteilung M 31 A Kap. 7.5 festgelegten Voraussetzungen für die Zertifizierung als Erstbehandlungsanlage nach ElektroG [6]. Durch die Verankerung in der Behandlungsverordnung sollen die Erstbehandler verpflichtet werden, betriebliche Maßnahmen zur Verbesserung von Schadstoffentfrachtung und Rückgewinnung von Ressourcen nach dem Stand der Technik im Behandlungskonzept festzulegen und umzusetzen. Auch die kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung (vgl. Behandlungsanforderung 4) durch Integration in das Behandlungskonzept wird so möglich.

Das Behandlungskonzept enthält mindestens:

- die Arbeitsabläufe der Erstbehandlungsanlage,
- Stoffflussdiagramme,
- Arbeitsanweisungen für einzelne Arbeitsschritte bei der Behandlung bestimmter EAG,
- eine Überprüfung der Folgebehandler,
- die Erstellung eines Kontrollplans für Grenz- und Zielvorgaben
- eine Defizitanalyse und Gegenmaßnahmen.

Ziel dieser Anforderung ist, dass Erstbehandlungsanlagen ein Behandlungskonzept erstellen, in dem sämtliche Maßnahmen der Erstbehandlung quantifizier- und qualifizierbar beschrieben werden, mit denen sichergestellt werden soll, dass die Behandlungsanforderungen des ElektroG (insbesondere § 20 und Anlage 4 ElektroG) und der geplanten Behandlungsverordnung ordnungsgemäß und dauerhaft eingehalten werden. Die erste Behandlungsanlage trägt die Verantwortung für die Erfüllung aller Behandlungsanforderungen, selbst wenn diese in kaskadierenden Prozessen bzw. nachgeschalteten, weiteren (Erst- oder Folge-) Behandlungsanlagen durchgeführt werden.

In dem Behandlungskonzept sind geeignete und wirksame Abläufe zu beschreiben, um im laufenden Betrieb eine ordnungsgemäße Schadstoffentfrachtung und Wertstoffseparation sicherzustellen. Aus dem Behandlungskonzept geht hervor, welche Maßnahmen getroffen werden, um die Grenz- und Zielvorgaben für bestimmte Stoffströme sowie die weiteren Prozessanforderungen einzuhalten. Die Arbeitsanweisungen werden den Mitarbeitern bekannt gemacht und in Unterweisungen einbezogen. Sie enthalten alle notwendigen Informationen zur Durchführung der Arbeitsschritte, beispielsweise zur Erkennung PCB-haltiger Kondensatoren und ihrer zerstörungsfreien Separierung (vgl. Behandlungsanforderung 54: Entfernung PCB-haltiger und Elektrolytkondensatoren).

Alle notwendigen Daten zur Überprüfung der festgelegten Grenz- und Zielvorgaben werden im Betriebstagebuch dokumentiert. Das Betriebstagebuch enthält mindestens:

- die Dokumentation aller Eingangsmengen (nach Kategorien, Bildschirmgeräte: aufgliedert nach CRT-Monitoren/-Fernsehern und FBS-Geräten),
- die Dokumentation der ausgehenden Stofffraktionen und -mengen zur Verwertung und Beseitigung,
- Informationen über die Qualität und Verwendung ausgehender Stoffströme,
- Ergebnisse von internen Kontrollen der Schadstoffentfrachtung und Wertstoffgewinnung.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Die Dokumentation der ein- und ausgehenden Stoffströme im Betriebstagebuch ist in LAGA-Mitteilung M 31 A, der Ergebnisse über interne Kontrollen in CENELEC EN 50625-1 festgeschrieben. Informationen zur Qualität und Verwendung des ausgehenden Materials sind zur Überprüfung einiger Behandlungsanforderungen wie Behandlungsanforderungen 4, 5, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 21, 33, 38, 42, 47, 48 und 56 notwendig.

Die Überprüfung der Zweckdienlichkeit und Wirksamkeit des Behandlungskonzepts, seiner Anwendung in der betrieblichen Praxis und der Einhaltung der Grenz- und Zielvorgaben sowie der Umsetzung der identifizierten Maßnahmen aus der Defizitanalyse findet im Rahmen der Zertifizierung als Erstbehandlungsanlage statt. Bei Nichteinhalten ist die Zertifizierung nur zu erteilen, wenn der Erstbehandler Anpassungen des Behandlungskonzepts vornimmt, die geeignet sind, eine ordnungsgemäße Schadstoffentfrachtung und die Einhaltung der Grenz- und Zielvorgaben sicherzustellen. Zusätzlich zu den Arbeitsabläufen und regelmäßigen Kontrollen der Schadstoffentfrachtung umfasst das Behandlungskonzept auch die Aspekte der Wertstoffseparierung, unter anderem die Abläufe der kontinuierlichen Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung (siehe Behandlungsanforderung 4).

Teilweise können Grenzwerte, die zur Überprüfung der Separationsleistung schadstoffhaltiger Bauteile dienen, überschritten werden, ohne dass die Behandlung der EAG unsachgemäß durchgeführt wurde. Ein Beispiel ist der Grenzwert von 50 mg/kg für PCB in der nichtmetallischen Restfraktion und im Staub, der als Indikator für die Separation von PCB-haltigen Kondensatoren dient (vgl. Behandlungsanforderung 55). In AG 5 wurde berichtet, dass in einigen Fällen der Grenzwert im Staub durch PCB-Eintrag in die Behandlungskette aus anderen Schadstoffquellen, z. B. Anstrichen und Elastomeren, überschritten werden kann. In solchen Fällen kann der Erstbehandler die sachgemäße Behandlung auch durch Darlegen der getroffenen Maßnahmen zur vollständigen Erkennung und Separation der in Anlage 4 ElektroG aufgeführten PCB-haltigen Kondensatoren im Behandlungskonzept nachweisen.

Bei Unterschreitung der geforderten Zielwerte für die Bauteilseparation und die werkstoffliche Verwertung (Behandlungsanforderung 3 für Leiterplatten, Behandlungsanforderung 14 für CRT-Glas, Behandlungsanforderung 38 für Kunststoffe, Behandlungsanforderung 48 für Batterien und Behandlungsanforderung 56 für Kondensatoren) ist je Berichtsjahr eine Defizitanalyse mit Gegenmaßnahmen bzw. eine Ursachenanalyse vorzunehmen.

#### **4.7.3 Revisionsklausel/Evaluierung der Ziel- und Grenzwerte**

Die in den Behandlungsanforderungen vorgesehenen Grenz- und Zielwerte sollen spätestens drei Jahre nach Inkrafttreten der Behandlungsverordnung kritisch überprüft werden, um einerseits sicherzustellen, dass die vorgegebenen Werte von den Behandlern erreicht werden können und andererseits anspruchsvolle Ziele der Schadstoffentfrachtung bzw. Ressourcenschonung vorzugeben. Die bei der Aktualisierung ermittelten neuen Grenz- und Zielwerte sollten spätestens fünf Jahre nach Inkrafttreten der Behandlungsverordnung in Kraft treten. Danach sollen regelmäßig die Werte aufgrund des technischen Fortschritts angepasst werden. Alle zu revidierenden Werte müssen rechtlich so gefasst werden, dass eine aufwandsarme Aktualisierung der BehandV ermöglicht wird. Die Revisionsklausel bezieht sich auf die Behandlungsanforderungen 3, 14, 15, 16, 17, 23, 31, 38, 47, 48, 55 und 56.

Die aus den CENELEC-Normen übernommenen Zielwerte für Batterien und Kondensatoren stammen aus europäischen Erhebungen unter WEEELABEX, die mittlerweile mehrere Jahre alt sind und eventuelle länderspezifische Gegebenheiten und aktuelle Änderungen der Gerätezusammensetzung nicht widerspiegeln. Darüber hinaus gelten ab dem 01.12.2018 neue Sammelgruppen für EAG. Für die in den neuen Sammelgruppen, respektive Kategorien, erreichbaren Grenz- und Zielwerte liegen noch keine Erfahrungswerte vor. Die in diesem Bericht vorgeschlagenen Grenz- und Zielwerte sind daher als Basiswerte für eine Behandlungsverordnung anzusehen, jedoch anschließend durch Werte fortzuschreiben, die den aktuellen Stand der Technik in den deutschen Erstbehandlungsanlagen darstellen.

Die Überprüfung der Ziel- und Grenzwerte findet spätestens drei Jahre nach Inkrafttreten der BehandV statt, wobei ggf. neue/angepasste Werte dann nach fünf Jahren nach dem Inkrafttreten der BehandV gelten sollen. Zudem sind Folgeüberprüfungen alle 5 Jahre durchzuführen. Jährlich sollen die Daten über die in den einzelnen Betrieben erreichten Werte erhoben werden und nach dem Ende des Kalenderjahres übermittelt werden. Für die Datenermittlung ist einer der folgenden Wege zu wählen:

- Direktübermittlung der EBA an UBA (elektronischer Fragebogen als BehandV-Anlage, Neuaufbau eines Meldesystems, Anpassung des ElektroG),
- BA an Destatis an UBA (UStatG und Fragebogen anpassen),
- EBA an ear (Anpassung ElektroG bezüglich Meldepflichten der EBA an ear, Anpassung § 32 Meldung ear an UBA),
- Zertifizierer an die zuständige Überwachungsbehörde, diese an UBA (Anpassung ElektroG bezüglich Zertifizierung, Meldepflichten der Behörden an UBA),
- Stichprobenartige Datenmeldung mittels Fragebogen auf freiwilliger Basis und damit rechtlich unverbindlich, z. B. Erhebung und Auswertung mittels Forschungsvorhaben.

Es soll außerdem die Information übermittelt werden, ob das vorgelegte Behandlungskonzept als hinreichend zur Einhaltung der jeweiligen Ziel- und Grenzwerte angesehen werden kann. Im Fragebogen sind Ziel- und Grenzwertverfehlungen kurz zu begründen. Das Umweltbundesamt wertet diese Daten aus, um revidierte Werte festlegen zu können.

Für die Fortschreibung der Leiterplattenquote in Behandlungsanforderung 3 sollte zusätzlich eine Erhebung und Auswertung der erreichten Mengen an Leiterplattenfraktionen erfolgen für die Kategorien 1 (Wärmeüberträger), 4 (Großgeräte, ohne Photovoltaikmodule), 5 (Kleingeräte, ohne Photovoltaikmodule) und Kategorie 6 (Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte) erfolgen, um eine Einführung einer Leiterplattenquote für diese Kategorien bei der ersten Revision zu prüfen.

Außerdem sind im Fragebogen die Elektroaltgeräte mit BeO-haltigen Bauteilen aus der Erstbehandlung und deren Mengen (Behandlungsanforderung 57) mitzuteilen, um eine Datenlage für den neu aufgenommen Schadstoff zu schaffen.

## 5 CENELEC Zusammenfassung

Unter dem Mandat M/518 der EU-Kommission - Mandate for the development of (a) standards for the treatment of waste electrical and electronic equipment (WEEE) – wurden von dem Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) Mindestqualitätsanforderungen an das WEEE-Management zur Sammlung, Logistik, Behandlung und Schadstoffentfrachtung von EAG in der Normenreihe CENELEC EN 50625 und den dazugehörigen technischen Spezifikation CENELEC TS 50625 erarbeitet und teilweise veröffentlicht (vgl. Tabelle 2, Kapitel 2.4.2). Die Anforderungen der Normen und technischen Regelungen sollen den Stand der Technik widerspiegeln. Die Normen und technischen Spezifikationen sind nicht unmittelbar rechtsverbindlich.

Im Zusammenhang mit den Behandlungsempfehlungen des UBA für die Weiterentwicklung der Behandlungsanforderungen nach ElektroG im Zuge einer geplanten Behandlungsverordnung für EAG wurden in diesem Bericht auch die aktualisierten bzw. neuen Normen und technischen Regeln ausgewertet, um hieraus mögliche Erfordernisse für weitergehende Anforderungen an die Erstbehandlung für EAG ableiten zu können.

Bei der Auswertung der CENELEC-Normenreihe 50625 und den dazugehörigen technischen Spezifikationen wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- ▶ Abgleich der in den Normen enthaltenen Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung mit der Schadstoffentfrachtung nach Anlage 4 ElektroG,
- ▶ Abgleich der in den Normen enthaltenen Anforderungen mit der in Deutschland etablierten Behandlungspraxis,
- ▶ Darstellung der in der Normenreihe enthaltenen Anforderungen zur Wertstoffrückgewinnung,
- ▶ Darstellung und Bewertung der in der Normenreihe enthaltenen Instrumente zu Monitoring und zur Auditierung.

Die Anforderungen aus den Normen und den technischen Spezifikationen wurden zudem hinsichtlich eines möglichen Regelungserfordernisses in einer Behandlungsverordnung bewertet.

Im Ergebnis ist die Auswertung der CENELEC-Normenreihe 50625 und der dazugehörigen technischen Spezifikationen, wie nachfolgend beschrieben, in diesen Bericht eingeflossen.

### 5.1 Auswertung der CENELEC-Normenreihe EN/TS 50625

#### 5.1.1 Allgemeine Hinweise

Zu jeder Behandlungsanforderung (vgl. Behandlungsanforderungen 1 bis 57) widmet sich ein Unterabschnitt den CENELEC-Normen. Hierbei wird beschrieben, ob die empfohlene Behandlungsanforderung bereits Gegenstand einer CENELEC-Norm ist, ggf. in welcher Norm sie thematisiert wird und welches Regelungserfordernis die CENELEC-Anforderung anspricht.

Zielführende und geeignete Anforderungen aus den Normen wurden zur Formulierung von Behandlungsempfehlungen teilweise übernommen und sind gegebenenfalls als CENELEC-Anforderung in der Behandlungsanforderungskurzübersicht (vgl. Kasten mit Kurzübersicht zu

den Behandlungsanforderungen 1 bis 57, Kapitel 4.1 bis 4.5) sowie im Behandlungskompass gekennzeichnet.

Zusätzlich sind in der Behandlungsanforderungskurzübersicht Monitoring-Vorgaben für jede Behandlungsempfehlung beschrieben.

### **5.1.2 Wertstoffrückgewinnung**

Bezüglich der Wertstoffrückgewinnung stellen die CENELEC-Normen Anforderungen zu Mindestmetallausbeuten von Kupfer und der Edelmetalle Gold, Silber und Palladium. Diese Anforderungen gelten für die zur Endbehandlung zugeführten Elektro- und Elektronik-Altgeräte bzw. deren Fraktionen.

Die Anforderungen aus den CENELEC-Normen zu den Mindestedelmetallausbeuten wurden übernommen, um hohe Edelmetallverluste zu vermeiden, da die Anforderungen den derzeitigen Stand der Technik in etwa widerspiegeln und von den Metallhütten in Deutschland umgesetzt werden.

Die Rückgewinnung von Metallen wie Aluminium, Eisen, kritischen Rohstoffen wie Indium, Gallium oder Silizium sowie Wertstoffen wie Kunststoffen oder Glas wird in der CENELEC-Normenreihe nicht adressiert. Aufgrund des hohen ökologischen Potenzials eines werkstofflichen Recyclings dieser Materialien gehen die empfohlenen Behandlungsanforderungen teilweise über die CENELEC-Anforderungen hinaus.

In der Tabelle 33 und Tabelle 34 sind die aus der CENELEC-Normenreihe EN 50625 und den dazugehörigen technischen Spezifikationen TS 50625 übernommenen sowie die nicht in CENELEC aus UBA-Sicht adressierten Anforderungen zur Wertstoffrückgewinnung und hierzu empfohlene Behandlungsanforderungen dargestellt.

**Tabelle 33: Übernommene Anforderungen aus der CENELEC-Normenserie EN 50625**

EN 50625-5 Kupfer und Edelmetalle	Behandlungsanforderung: 5	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: teils
Thema und Inhalt	Endbehandlung von Leiterplattenfraktionen in metallurgischen Prozessen der Rückgewinnung von Edel- und Buntmetallen nach dem Stand der Technik.		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung zum Rückgewinnungsgrad für Kupfer und Edelmetalle bei der Leiterplattenverwertung: je 90 % für Cu, Au, Ag, Pd. In den Rückgewinnungsgrad dürfen lediglich die elementar oder als Legierung gewonnen Metalle eingerechnet werden.		
UBA- Ergänzungen zu CENELEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückgewinnungspflicht (qualitativ, ohne quantitative Vorgabe) für weitere Metalle, die nach dem Stand der Technik in integrierten Metallhütten aus Leiterplatten zurückgewonnen werden: Zinn, Blei und Antimon.</li> <li>• Verschärfung der immissionsschutzbezogenen Anforderungen der CENELEC-Norm. Hierzu wurden zwei Parameter gewählt, die für die Verwertung von Leiterplatten relevant sind: Dioxine und Staub. Die Verschärfung ist notwendig, da die CENELEC-Anforderungen teilweise weniger anspruchsvoll sind, als die Anforderungen der Industrieemissionen-Richtlinie, die innerhalb der EU den Stand der Technik verbindlich beschreiben: PCDD/F-Grenzwert nach CENELEC-Norm: 0,5 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>. PCDD/F BVT-assoziierter Emissionswert laut BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie: 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>. CENELEC: Abluftgrenzwerte gelten für die jährlichen Durchschnittswerte. BVT-Schlussfolgerungen: Die Emissionswerte gelten für die Mittelwerte über den Probenahmezeitraum (ggf. Tagesmittelwerte), was eine strengere Anforderung darstellt.</li> <li>• In den Kommentierungen zum Entwurf der CENELEC EN 50625-5 hat sich das UBA erfolglos für die Aufnahme eines Rückgewinnungsgrades für Zinn, Blei und Antimon eingesetzt sowie für die Angleichung der Emissionsgrenzwerte an die Emissionswerte der BVT-Schlussfolgerungen für die Nichteisenmetallindustrie.</li> </ul>		

**Tabelle 34: Empfohlene Behandlungsanforderungen, die in CENELEC nicht adressiert werden**

Anforderungen aus UBA-Sicht, die NICHT in CENELEC adressiert werden	hierzu empfohlene Behandlungsanforderung		Stand der Technik
Rückgewinnung/ Verwertung weiterer Metalle und kritischer Rohstoffe	5	Abgabe separierter Leiterplattenfraktionen und edelmetallhaltiger schadstoffentfrachteter Altgeräte zur metallurgischen Rückgewinnung nur an Anlagen: 1) ... 2) mit Rückgewinnung von Sn, Pb, Sb in der Prozesskette	Ja
	24	Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung des Indiums aus FBS-Geräten	nein
	34	Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen	Ja
	35	werkstoffliche Verwertung von Aluminium aus der Behandlung der PV-Module	teils
	36, 37	Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung In, Ga, Ag, Si aus PV-Modulen	nein
Rückgewinnung/ Verwertung Kunststoffe	11, 38	werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen im Umfang von jeweils X % der jeweiligen Kategorie	teils
	22	Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten und werkstoffliche Verwertung	teils
	39	Separation von losen Kunststoffinnenteilen für Geräte aus Behandlungsanlagen von Kühl- und Tiefkühlgeräten	teils
Rückgewinnung/ Verwertung Glas	14	werkstoffliche Verwertung von min. 25 Gew.-% des Glases des CRT-Geräteinputs	Ja
	33	vorrangige Verwertung von Glas aus PV-Modulen als Flachglas oder Behälterglas	teils
	39	Separation von losen Glasteilen für Geräte aus Behandlungsanlagen von Kühl- und Tiefkühlgeräten	teils
Rückgewinnung/ Verwertung von Bauteilen	7	Separation SE-haltiger Magneten	nein
	51	Zuführung der geeigneten, vollständig erhaltenen und unbeschädigten Tonerkartuschen sowie der Tintenpatronen in Behandlungsanlagen für die VzW	teils

### 5.1.3 Schadstoffentfrachtung

Die Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung sind konform mit den Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung nach der WEEE-Richtlinie und Anlage 4 des ElektroG.

Ein Konzept von CENELEC ist es, den Erfolg der Schadstoffentfrachtung messbar zu machen, insbesondere durch Grenz- und Zielwerte für geeignete Parameter, teilweise werden Stellvertreterparameter genutzt, z. B. ein Cadmium-Grenzwert als Maß für eine erfolgreiche Batterieentfrachtung.

Aus den Anforderungen der CENELEC-Normen wurden überwiegend Grenz- und Zielwerte für Outputfraktionen aus der Erstbehandlung von EAG als empfohlene Behandlungsanforderungen

in diesen Bericht übernommen, da diese dem derzeitigen Stand der Technik, als Gradmesser für ein hohes Maß an Schadstoffentfrachtung, entsprechen und die vorschriftsmäßig arbeitenden Erstbehandler diese, nach den derzeitigen Erkenntnissen aus den Arbeitskreis- und Arbeitsgruppentreffen, einhalten können. Zudem liegen für die angegebenen Grenz- und Zielwerte noch keine Vergleichswerte vor, welche einen höheren Grad an Schadstoffentfrachtung versprechen.

Für die aus CENELEC-Normen übernommenen Werte wird eine Revisionsklausel (vgl. Kapitel 4.7.3) empfohlen, wo demnach alle Grenz- und Zielwerte zu deren möglicher Fortschreibung nach 3 Jahren evaluiert werden. Zum einen geht es darum, die Werte aus CENELEC-Normen, die auf veralteten Werten aus früheren Jahren bzw. auf Werten aus anderen EU-Mitgliedstaaten beruhen, an die derzeitigen Abfallzusammensetzungen anzupassen und die aktuell erreichbaren Entfrachtungsmengen zu aktualisieren. Zum zweiten soll das Ziel verfolgt werden, den Grad der Schadstoffentfrachtung noch zu erhöhen.

Einige Erstbehandler gaben nach der letzten AK-Sitzung in ihrer schriftlichen Stellungnahme an, dass eine regelmäßige Anpassung der Ziel- und Grenzwerte an veränderte Materialinhalte notwendig sei. Sie halten die Festlegung von Ziel- und Grenzwerten in einer Verordnung für problematisch. Daher schlagen sie vor, als Ziel- und Grenzwerte die jeweils aktuellen Werte aus CENELEC EN/TS 50 625 anzuwenden, die einem regelmäßigen Anpassungsprozess unterliegen. Sie fordern somit, dass die Ziel- und Grenzwerte dann als eingehalten anzusehen sind, wenn die jeweils gültigen Werte der CENELEC EN/TS 50 625 erreicht werden.

In der Tabelle 35 sind die aus der CENELEC-Normenreihe EN 50625 und den dazugehörigen technischen Spezifikationen TS 50625 übernommenen sowie die nicht in den CENELEC-Normen aus UBA-Sicht adressierten Anforderungen zur Schadstoffentfrachtung und hierzu empfohlene Behandlungsanforderungen dargestellt.

**Tabelle 35: Übernommene Anforderungen aus der CENELEC-Normenreihe 50625 und nicht adressierte Anforderungen zur Schadstoffentfrachtung**

TS 50625-3-3 Bildschirmgeräte	vgl. zu Behand-Anf.: 15	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Schwefelkonzentration in gereinigter Glasfraktion von CRT-Geräten: max. 5 mg/kg		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung, da hoher Grad der Schadstoffentfrachtung gemäß CENELEC und keine eigenen Vergleichswerte vorhanden, Zustimmung der Akteure aus AK und AG</li> </ul>		
TS 50625-3-3 Bildschirmgeräte	vgl. zu Behand-Anf.: 17	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Grenzwerte für CRT-Glas in sonstigen Fraktionen von 8 % in Elektronenkanonen, 4 % in Ablenkeinheit, 2 % CRT-Glas in Fraktionen aus Antiexplosionsrahmen, Lochmasken und ggf. weiteren Bestandteilen		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung, da hoher Grad der Schadstoffentfrachtung gemäß CENELEC und keine eigenen Vergleichswerte vorhanden, Zustimmung der Akteure aus AK und AG</li> </ul>		
TS 50625-3-3 Bildschirmgeräte	vgl. zu Behand-Anf.: 16	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: teils
Thema und Inhalt	PbO-Gehalt der Schirmglasfraktion aus CRT-Geräten von max. 0,5 %		

UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vergleichswert aus LAGA M 31 B beschreibt, dass ein höherer Grad der Schadstoffentfrachtung möglich ist</li> <li>Übernahme der CENELEC-Anforderung, mit einem veränderten Grenzwert des PbO-Gehalts in der Schirmglasfraktion von max. 0,1 %</li> </ul>		
TS 50625-3-3 Bildschirmgeräte	vgl. zu Behand-Anf.: 23	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Fraktionen aus FBS-Geräten zur Verwertung (ausgenommen Lampenglas) dürfen einen Grenzwert von maximal 0,5 mg Hg / kg nicht überschreiten		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung, da hoher Grad der Schadstoffentfrachtung gemäß CENELEC und keine eigenen Vergleichswerte vorhanden, Zustimmung der Akteure aus AK und AG.</li> </ul>		
UBA-Ergänzungen zu CENELEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>zusätzlich zur Einhaltung des Grenzwerts wird empfohlen, eine separate Lampenfraktion bei FBS-Geräten zu erzeugen (vgl. Behand-Anf.: 19) sowie</li> <li>keine gemeinsame Folgebehandlung von FBS-Geräten und Lampen (vgl. Behand-Anf.: 20)</li> </ul>		
TS 50625-3-5 PV-Module	vgl. zu Behand-Anf.: 31	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Grenzwerte für Blei, Cadmium und Selen in Glasfraktionen aus der Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten PV-Modulen		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Akteure aus AK und AG bewerten die von CENELEC empfohlenen Grenzwerte als zu gering für eine hochwertige Schadstoffentfrachtung. Die Recyclinganlagen halten geringere maximale Schadstoffgehalte ein und schlugen korrigierte Grenzwerte vor</li> <li>Übernahme der CENELEC-Anforderung, mit veränderten Grenzwerten für nicht-siliziumbasierte Module: Pb- und Se-Gehalt: 10 mg/kg, Cd-Gehalt 1: mg/kg.</li> </ul>		
UBA-Ergänzungen zu CENELEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>empfohlene Grenzwerte sollten für Glas und andere Fraktionen zur Verwertung aus der Behandlung von PV-Modulen gelten</li> <li>mit der Empfehlung der Zulässigkeit für die gemeinsame Behandlung verschiedener PV-Modultechnologien, werden Grenzwerte für Blei, Cadmium und Selen aus der gemeinsamen Behandlung von siliziumbasierten und nicht-siliziumbasierten empfohlen: Grenzwerte für Glas und andere Fraktionen zur Verwertung von 10 mg Pb/kg, 1 mg Se/kg, 1 mg Cd/kg</li> </ul>		
EN 50625-2-4 PV-Module	vgl. zu Behand-Anf.: 32	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Vermischungs- und Verdünnungsverbot schadstoffhaltiger PV-Fraktionen mit anderen Fraktionen, um deren Konzentration zu verringern		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung, da Schadstoffkontaminationen und Schadstoffverschleppungen reduziert und oder vermieden werden können. Zudem wird die Qualität schadstofffreier Fraktionen nicht beeinträchtigt</li> </ul>		
TS 50625-3-1 Schadstoffentfrachtung	vgl. zu Behand-Anf.: 42 u. 43	ElektroG: Anlage 4 Nr. 1 e)	Stand der Technik: teils
Thema und Inhalt	Abtrennung von Kunststoffen, die bromierte Flammschutzmittel enthalten		

UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übernahme der CENELEC Anforderung in variiertes Form</li> <li>• Verpflichtende Separation von Kunststoffteilen eines Altgerätes (anhand einer Liste), die durch POP-VO geregelte Flammschutzmittel oberhalb der festgelegten Grenzwerte enthalten</li> </ul>		
TS 50625-3-1 Schadstoffentfrachtung	vgl. zu Behand-Anf.: 47	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Grenzwert von 100 mg Cd/ kg in der feinsten NMRF		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung, da keine Vergleichswerte vorhanden sind</li> <li>• Grenzwert kann von Erstbehandlungsanlagen nicht immer eingehalten werden, was dementsprechend auf eine mangelnde Separation der Altbatterien hindeutet und nicht nach dem Stand der Technik erfolgt. Im Falle von Grenzwertüberschreitungen muss daher die Separation von Batterien optimiert werden.</li> </ul>		
TS 50625-3-1 Schadstoffentfrachtung	vgl. zu Behand-Anf.: 48	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Separation von min. 1,8 kg Altbatterien pro Tonne des Inputs Kleingeräte		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung</li> <li>• Zielwert wird nicht immer erreicht, spricht aber bei Erreichung des Wertes für eine zuverlässige Batterieseparation bei der Erstbehandlungsanlage</li> <li>• Anlage 4 Nr. 1 b) ElektroG fordert nur die Entfernung von Batterien und Akkumulatoren aus EAG</li> </ul>		
EN 50625-1 Allgemeine Anforderungen	vgl. zu Behand-Anf.: 46, 54	ElektroG: Anlage 4	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	bei der Schadstoffentfrachtung dürfen keine Bauteile beschädigt oder zerstört werden, wenn dadurch Schadstoffe freigesetzt werden, die in die Umwelt oder in Fraktionen gelangen		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Übernahme der CENELEC-Anforderung, da bereits nach Anlage 4 Nr. 1 Satz 3 ElektroG geregelt</li> </ul>		
UBA-Ergänzungen zu CENELEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zerstörungsfreie Separation von nicht zugänglichen Altbatterien (vgl. Behand-Anf.: 46)</li> <li>• zerstörungsfreie Separation von Kondensatoren (vgl. Behand-Anf.: 54)</li> </ul>		
TS 50625-3-1 Schadstoffentfrachtung	vgl. zu Behand-Anf.: 55	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Grenzwert von 50 mg PCB / kg in der feinsten NMRF		
UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der empfohlene Grenzwert sollte auch für die Staubfraktion gelten</li> <li>• Übernahme der CENELEC-Anforderung, mit Ergänzung, dass der PCB-Grenzwert auch für die Staubfraktion einzuhalten ist; Vergleichswerte sind nicht vorhanden</li> </ul>		
UBA-Ergänzungen zu CENELEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Überschreitung des Grenzwerts ist im Behandlungskonzept zu dokumentieren, wie Kondensatoren ordnungsgemäß separiert werden</li> </ul>		
TS 50625-3-1 Schadstoffentfrachtung	vgl. zu Behand-Anf.: 56	ElektroG: k.A.	Stand der Technik: ja
Thema und Inhalt	Separation von Kondensatoren		

UBA-Bewertung der CENELEC Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1:1-Übernahme der CENELEC-Anforderung</li> <li>• Entsprechend den Aussagen von Erstbehandlern während AK- und AG-Treffen werden die Zielwerte üblicherweise erreicht, wenn eine zuverlässige Kondensatorseparation in der EBA erfolgt</li> <li>• Anlage 4 Nr. 1 n) ElektroG fordert nur die Entfernung von Elektrolytkondensatoren aus EAG</li> </ul>		
Anforderungen aus UBA-Sicht, die NICHT in CENELEC adressiert werden	hierzu empfohlene Behandlungsanforderung		Stand der Technik
CRT-Glas	13	Trennung von Pb-haltigem Konusglas und Pb-freiem Schirmglas	ja
Dentalmedizinische Geräte	44	Verpflichtende Separation von Quecksilber aus dentalmedizinischen EAG vor mechanischer Zerkleinerung	ja
Berylliumoxid-haltige Bauteile	57	Verpflichtende Separation BeO-haltiger Bauteile aus gewerblichen EAG vor mechanischer Zerkleinerung	Teils

#### 5.1.4 Behandlungspraxis in Deutschland

Die von den CENELEC-Normen geforderten Anforderungen an die Behandlungspraxis von EAG umfassen die Entgegennahme von EAG an der Behandlungsanlage, die Handhabung von EAG, die Lagerung von EAG vor der Behandlung, die Schadstoffentfrachtung, die Behandlung von nicht entfrachteten EAG und Fraktionen, die Lagerung von Fraktionen während und aus der Behandlung, die Zielvorgaben für Recycling und Verwertung sowie die Verwertung und Beseitigung von Fraktionen. Im Vergleich zur selektiven Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen von EAG und zu den technischen Anforderungen an Standorte für die Lagerung und Behandlung von Altgeräten nach Anlage 4 und 5 ElektroG gehen die CENELEC-Anforderungen hierüber hinaus, indem zahlreichere und detailliertere Vorgaben an die Behandlungspraxis gestellt werden.

Ein Abgleich der in den Normen enthaltenen Anforderungen an die Behandlungspraxis von EAG mit der in Deutschland etablierten Behandlungspraxis hat keine nennenswerten Unterschiede erkennen lassen. Die in der CENELEC-Normenreihe 50625 und den dazugehörigen technischen Spezifikationen beschriebenen Anforderungen an die Behandlungspraxis entsprechen weitestgehend dem Stand der Technik und gewährleisten bei ordnungsgemäßer Ausführung ein hohes Maß an Schadstoffentfrachtung, Wertstoffrückgewinnung und Umweltschutz.

#### 5.1.5 Monitoring und Auditierung

Mit Anforderungen zu Managementgrundsätzen, zu den technischen und infrastrukturellen Voraussetzungen, zur Ausbildung von Mitarbeitern der EBA, zur Überwachung allgemein sowie der Schadstoffentfrachtung und zur Dokumentation adressieren die CENELEC-Normen die Aspekte des Monitorings und der Auditierung bei der Behandlung von EAG. Die Anforderungen sind wichtige Instrumente, um eine kontinuierliche Verbesserung der Behandlungsverfahren, der Wertstoffrückgewinnung und der Qualität der Schadstoffentfrachtung zu erreichen und sicherzustellen.

Nach CENELEC EN 50625-1 ist der Betreiber einer Behandlungsanlage für die Dokumentation der Herkunft der behandelten EAG, der Erstbehandlungs- und Folgebehandlungskette und der generierten Fraktionen aus der Behandlung verantwortlich, bis diese das Ende der

Abfalleigenschaft erreicht haben oder bis die EAG zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt, verwertet oder entsorgt sind.

In Anlehnung an die Monitoring- und Auditierung-Anforderungen aus der CENELEC-Normenreihe 50625 empfiehlt das UBA als übergreifende Empfehlung für alle Behandlungsempfehlungen in diesem Bericht ein Behandlungskonzept, das der Nachvollziehbarkeit der Behandlungsmaßnahmen in einer EBA für EAG dient (vgl. Kapitel 4.7.1).

In Tabelle 36 sind die Anforderungen an das Monitoring und Auditierung aus der CENELEC-Normenreihe 50625 und ein Abgleich mit dem Behandlungskonzept ggf. mit einem Verweis auf Beispiele dargestellt.

Bestimmte Abschnitte der CENELEC-Normen stellen Anforderungen an das Monitoring und die Auditierung in einer Behandlungsanlage, welche in Deutschland bereits rechtsverbindlich geregelt sind, z. B. im BImSchG, der 4. BImSchV und/oder der EfbV. Die Anforderungen dieser Regelwerke sind teilweise abhängig vom Betrieb dieser Anlage. Unterschieden wird hierbei u. a. zwischen

- ▶ Anlagen, die eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung benötigen,
- ▶ Anlagen nach der Industrieemissions-Richtlinie (IED-Anlagen)
- ▶ und Anlagen, die keine immissionsschutzrechtliche Genehmigung benötigen.

Die Genehmigungsvoraussetzung der Anlagen ist dabei u. a. abhängig von

- ▶ der Anlagenart,
- ▶ der behandelten, der zu verarbeitenden, der rückzugewinnenden Geräte, Bauteile, Stoffe und Abfälle,
- ▶ dem Durchsatz je Stunde, Tag oder Jahr,
- ▶ und/oder der Kapazität der Anlage für zu lagernde, zu behandelnde, zu verarbeitende, rückzugewinnenden Geräte, Bauteile, Stoffe und Abfälle.

Aufgrund der je nach Anlagentyp variierenden Genehmigungsvoraussetzung sind die Erstbehandlungsanlagen für EAG unterschiedlich genehmigt. In der Folge war eine generelle UBA-Bewertung, bzw. der Vergleich zum Behandlungskonzept in Bezug zu den Anforderungen aus den CENELEC-Normen an das Monitoring und die Auditierung, nicht möglich, da die Genehmigungssituationen der einzelnen Erstbehandlungsanlagen für EAG nicht zu Verfügung standen.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass Anlagen die unter die Industrieemissionsrichtlinie (IED) fallen, verpflichtet sind ein Managementsystem für alle Aktivitäten im Bereich von Gesundheit, Sicherheit, Umwelt und Qualität zu installieren und aufrechtzuerhalten. Die Schlussfolgerungen eines BVT-Merkblatts schreiben rechtsverbindlich die Installation eines Umweltmanagementsystems vor. Technische und infrastrukturelle Voraussetzungen sind in der Regel in der Anlagengenehmigung geregelt sowie teilweise in Anlage 5 ElektroG. CENELEC-Anforderungen an die Ausbildung der Mitarbeiter sind teilweise im ArbSchG, der GefStoffV und den entsprechenden TRGS geregelt. Die Dokumentation im Rahmen des Monitorings und der Auditierung wird regelmäßig durch die Genehmigungsbehörden bei IED-Anlagen überprüft. Bei IED-Anlagen erfolgt eine regelmäßige Inspektion, einschließlich der Kontrollberichte zur Wartung der Anlage und technischen Anlagen.

**Tabelle 36: Anforderungen der CENELEC-Normenreihe 50625 an eine Behandlungsanlage zu Monitoring und Auditierung im Vergleich zum UBA-Behandlungskonzept / UBA-Behandlungsanforderung**

CENELEC-Normenreihe 50625 zu Monitoring / Auditierung	Anforderung	Ableich zu Behandlungskonzept / Behandlungsanforderung
<b>Managementgrundsätze</b>	Managementsystem für alle Aktivitäten im Bereich von Gesundheit, Sicherheit, Umwelt und Qualität	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Belegen der Verbesserung dieser Aktivitäten durch ein Review- und Managementverfahren	im Behandlungskonzept berücksichtigt / Bsp. Behand-Anf.: 4
	Verfahren zur Identifizierung gesetzlicher Regelungen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
<b>Technische und infrastrukturelle Voraussetzungen</b>	Besitz einer geeigneten Infrastruktur, deren Größe, technologische Einrichtungen und Arbeitseigenschaften den Tätigkeiten der Anlage entsprechen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Risikobewertung von Standorten und Aktivitäten	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Konzipierung der Behandlungseinrichtungen (technischen Anlagen) und Lagerbereiche	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	wetterbeständige Abdeckung für bestimmte Bereiche	teilweise im Behandlungskonzept berücksichtigt / Bsp. Behand-Anf.: 9, 21, 27
<b>Ausbildung</b>	Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften der Einrichtungen müssen allen Mitarbeitern vertraut sein	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Mitarbeiterschulung und Überprüfung der Schulung zu maßgeblichen Arbeiten in der Anlage, zur Notfallplanung, zu Gesundheits- und Sicherheitsmaßnahmen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Am Arbeitsplatz verfügbar sein/ leicht zugänglich sein von u. a. Lernmaterialien, Informationen, Risikobewertungen, Sicherheitsangaben, Fotos/Beispiele von Bauteilen zu EAG, Sicherheitsdatenblättern	teilweise im Behandlungskonzept berücksichtigt
<b>Überwachung</b>	Aufzeichnungen über die Outputfraktionen des Behandlungsprozesses für Fraktionen, die das Ende der Abfalleigenschaft erreicht haben, Metallfraktionen, nicht metallische Fraktionen, gefährlicher Abfall-Fraktionen, alle anderen Fraktionen, Endfraktionen zur energetischen Verwertung oder Entsorgung	teilweise im Behandlungskonzept berücksichtigt

CENELEC-Normenreihe 50625 zu Monitoring / Auditierung	Anforderung	Ableich zu Behandlungskonzept / Behandlungsanforderung
<b>Überwachung der Schadstoffentfrachtung</b>	Durchführung und Dokumentation der Zielwert-Methodik, Massenbilanz-Methodik, Analyse-Methodik	im Behandlungskonzept berücksichtigt / Bsp. Behand-Anf.: 55, 56
	Überwachung und Kontrolle der Qualität der Entfrachtung von Kondensatoren, Batterien, Kunststoffen, Glasfraktionen	im Behandlungskonzept berücksichtigt / Bsp. Behand-Anf.: 48, 55, 56
<b>Dokumentation</b>	Aufzeichnungen, welche die Befolgung gesetzlicher und behördlicher Verpflichtungen belegen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Prozessdiagramme mit Informationen zu jedem durchgeführten Behandlungsschritt und den daraus resultierenden Fraktionen	im Behandlungskonzept berücksichtigt
	interne administrative Vorgänge und Dokumente von Managementprüfungs- und Verbesserungsabläufen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Ergebnisse interner Kontrollen und der Überwachung der Schadstoffentfrachtung	im Behandlungskonzept berücksichtigt
	interne administrative Vorgänge und Dokumente bezüglich der Zerstörung von Daten auf Permanent speichern	vgl. Rechtsrahmen zu Behand-Anf.: 7
	Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltüberwachungen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Berichte zur Wartung der Anlage und technischen Anlagen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Ausbildung der Mitarbeiter	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Anweisungen/Hinweise zu Verarbeitungsschritten einschließlich der manuellen Zerlegung	im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Ergebnisse der Testchargenverarbeitungen	im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Aufzeichnungen der Überwachung jeder Fraktion in der Folgebehandlung/-kette	im Behandlungskonzept berücksichtigt
	Aufzeichnungen über die Bestimmung der Recycling- und Verwertungsquoten	im Behandlungskonzept berücksichtigt
Aufzeichnungen aller durchgeführten Massenbilanzen	im Behandlungskonzept berücksichtigt	

CENELEC-Normenreihe 50625 zu Monitoring / Auditierung	Anforderung	Abgleich zu Behandlungskonzept / Behandlungsanforderung
	Aufbewahrungsfristen für Dokumente und Aufzeichnungen	nicht im Behandlungskonzept berücksichtigt

### 5.1.6 Fazit zur CENELEC-Normenreihe 50625

Die Wertstoffrückgewinnung wird in der CENELEC-Normenreihe nur unzureichend adressiert. Abgesehen von Anforderungen an die Rückgewinnung bestimmter Edelmetalle werden an wichtige und teils massenrelevante Rohstoffe wie Kunststoffe, Aluminium, Glas, kritische Rohstoffe oder einzelne Fraktionen keine Rückgewinnungsanforderungen bzw. Anforderungen zu einer hochwertigen Verwertung gestellt.

Die Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung sind neben den Anforderungen an das Monitoring und die Auditierung die zentralen Kernelemente der Normenreihe. Bei ordnungsgemäßer Ausführung der Anforderungen ist die Qualität der Schadstoffentfrachtung als hoch einzuschätzen.

Die in diesem Bericht empfohlenen Behandlungsanforderungen an die Behandlungspraxis umfassen u. a. generelle Anforderungen, Empfehlungen zur verpflichtenden Separation von Bauteilen aus EAG vor deren mechanischer (Grob-) Zerkleinerung und Verfahrensabläufe während der Behandlung. In Ergänzung zur Behandlungspraxis nach den CENELEC-Normen kann mit diesen Empfehlungen ein höherer Grad der Schadstoffentfrachtung und der Wertstoffrückgewinnung erreicht werden.

Zur Erreichung und Einhaltung der Ziele der Verbesserung der Behandlungsverfahren, der Wertstoffrückgewinnung und der Qualität der Schadstoffentfrachtung ist eine Kombination aus den Anforderungen der CENELEC-Normen an das Monitoring/Auditierung und der übergreifenden Empfehlung eines Behandlungskonzepts zu favorisieren.

## 6 Definitionen

Im Folgenden (Tabelle 37) sind die wichtigsten benötigten Definitionen aufgelistet.

**Tabelle 37: Definitionen verwendeter Begriffe**

Begriff	Definition
Adressat	Derjenige, der in der Anforderung als für die Erfüllung Verantwortlicher benannt wird.
(teil-) automatisch/automatisiert	Die (teil-) automatische Demontage von Elektrogeräten und Komponenten erfolgt maschinell (z. B. durch Demontageroboter). Der Geräteaufschluss erfolgt weitgehend zerstörungsfrei durch zielgerichtetes Lösen einzelner Verbindungen (z. B. Schrauben) oder die mechanische Auftrennung einzelner struktureller Komponenten bzw. die Abtrennung einzelner Zielkomponenten ohne Einwirkung ungerichteter mechanischer Kräfte auf andere Komponenten.
bruchsicher	Entladung, Lagerung und Transport von Altgeräten gelten als bruchsicher, wenn die Krafteinwirkung während des Prozesses so gering ist, dass aus den Geräten und Gerätekomponenten keine Schadstoffe freigesetzt werden können.
Elektro- und Elektronikgeräte	Entsprechend § 3 Absatz 1 ElektroG sind dies „Geräte, die für den Betrieb mit Wechselspannung von höchstens 1 000 Volt oder Gleichspannung von höchstens 1 500 Volt ausgelegt sind und a) zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb von elektrischen Strömen oder elektromagnetischen Feldern abhängig sind oder b) der Erzeugung, Übertragung und Messung von elektrischen Strömen und elektromagnetischen Feldern dienen;
energetische Verwertung	Als energetische Verwertung gelten Verfahren, die das Material als Brennstoff und den energetischen Gehalt des Materials zur Energieerzeugung nutzen [142].
(manuelle) Entnahme	(Händische bzw. teilautomatisierte) Separation von einzelnen Bauteilen.
Identifizierbarkeit von Komponenten	Die Identifizierbarkeit von Komponenten ist gegeben, wenn äußere Merkmale, die Informationen über Inhaltsstoffe geben können (z. B. Beschriftung, Gehäuseform), nach dem Aufschluss oder der Verarbeitung noch erkennbar sind.
nicht vom Altgerät umschlossene Batterien	Bezieht sich auf die § 10 Abs. 1 Satz 2 ElektroG genannten „Altbatterien und Altakkumulatoren, die nicht vom Altgerät umschlossen sind.“ → nicht relevant für BehandV
zugängliche, aber vom Altgerät umschlossene Batterien	Batterien, die ohne den Gebrauch von Universalwerkzeug entnommen werden können (z. B. unter Klappdeckel, Schiebeklappe, Gehäuseschale, oder geklippt). → siehe Behandlungsanforderung 45
nicht zugängliche Batterien	Alle sonstigen Batterien, die sich nur mit Werkzeug entnehmen lassen (z. B. unter verschraubter Abdeckung, verklebte Batterien). → siehe Behandlungsanforderung 46
mechanische (Grob-) Zerkleinerung	Zerkleinerung von Feststoffen unter mechanischer Einwirkung in oder mit Hilfe von Maschinen (z. B. Schredder, Querstromzerspaner, Rotorschere). Grobzerkleinerung wird als Zerkleinerung auf eine Korngröße zwischen $\leq 900$ mm bis $\leq 100$ mm definiert.
metallurgische Prozesse	Prozesse der Metallgewinnung und –raffination.

Begriff	Definition
NMRF	Nichtmetallische Restfraktion(en): Schredderfraktionen, die nach dem Eisenabscheider und Nichteisenmetallabscheider zurückbleiben [143].
Offener Anwendungsbereich/open scope	Ab dem 15.08.2018 fallen alle Elektro- und Elektronikgeräte (vgl. Definition oben) unter den Anwendungsbereich des ElektroG sofern sie keiner der gesetzlichen Ausnahmeregelungen unterfallen und sind den sechs Gerätekategorien zuzuordnen.
rohstoffliche Verwertung	Ein Material gilt als rohstofflich verwertet, wenn während der Verwertung die chemischen Eigenschaften derart verändert werden [142], dass ein Produkt entsteht, das sich funktional und chemisch vom Material im Ursprungsprodukt unterscheidet. Die Rohstoffliche Verwertung schließt die energetische Verwertung aus.
schonender Grobaufschluss	Aufbrechen des Gerätegehäuses unter Einwirkung mechanischer Kräfte, um die Entnahme innenliegender Gerätekomponenten ohne Beschädigung der Zielkomponenten zu ermöglichen. In Bezug auf Leiterplatten ist unter Beschädigung zu verstehen, dass die Leiterplatten im Altgerät nicht wesentlich zerkleinert werden und die darauf befindliche Bestückung zum großen Teil nicht abgetrennt wird.
Smarte Geräte	Haushaltsgroßgeräte (vgl. nicht abschließende Liste in Anlage 1 ElektroG in der Fassung vom 20. Oktober 2015) mit kabelgebundenem oder kabellosem Internet- oder Netzwerkanschluss. Beispiele: smarter Kühlschrank, internetgesteuerte Waschmaschine.
werkstoffliche Verwertung	Werkstoffliche Verwertung ist die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt (vgl. VerpackG).
Zerstörungsfrei (Kondensatoren)	Die Separation von Kondensatoren kann als „zerstörungsfrei“ betrachtet werden, wenn das Gehäuse nicht dermaßen beschädigt wurde, dass das Dielektrikum oder der Elektrolyt austreten kann.

## 7 Reihung der Behandlungsanforderungen von Elektroaltgeräten

Im Kapitel 4 sind in Abbildung 3: Behandlungskompass AG 1, 4 und 5 sowie in Abbildung 4: Behandlungskompass AG 2 und 3 alle vom UBA empfohlenen Anforderungen an die Behandlung von EAG übersichtlich in dem „Behandlungskompass“ zusammengefasst. Die 57 geräte- und bauteilspezifischen Behandlungsanforderungen verknüpfen in Kombination miteinander eine hochwertige Schadstoffentfrachtung und Ressourcenschonung. Alle vorgeschlagenen Behandlungsanforderungen werden dezidiert zur Umsetzung empfohlen. Die folgende Reihung der empfohlenen Behandlungsanforderungen setzt dabei Schwerpunkte bei der Behandlung u.a. auf Basis der Umweltrelevanz, ökonomischen sowie technischen Umsetzbarkeit, die mit allen übrigen Behandlungsanforderungen zusammen einen größtmöglichen Umweltnutzen entfaltet.

### 7.1 Platzierungskriterien

Die Reihung der Behandlungsanforderung erfolgte anhand von 5 Kriterien:

1. die ökologische Notwendigkeit (Umweltrelevanz),
2. das Wertschöpfungspotenzial (Erlöse/Ökonomie),
3. die praktische Umsetzbarkeit bei den EAG-Behndlern inklusive Aufwand der Behandlung (Umsetzbarkeit),
4. vergleichbare Anforderungen nach CENELEC-Normen der 50625-Serie und in anderen Staaten (vergleichbare Anforderungen), sowie
5. Positiver Effekt bei Inkrafttreten der Anforderung (Effektivität).

Die Beurteilung der Behandlungsanforderungen bezüglich der Kriterien erfolgte durch ein Punktesystem. Für das Kriterium der Umweltrelevanz wurden 0 bis 6 Punkte vergeben, für Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit wurden je 0 bis 3 Punkte vergeben. Für existierende vergleichbare Anforderungen wurde 1 Punkt vergeben. Somit wurde die Umweltrelevanz doppelt gewichtet gegenüber ökonomischen Aspekten und praktischer Umsetzbarkeit. Kombiniert wird ökonomisch-praktischen Erwägungen somit die gleiche Relevanz beigemessen wie der Umweltrelevanz. So konnte sichergestellt werden, dass in der Reihung weder ökologische Aspekte noch ökonomisch-praktische die Reihung dominieren. Die maximal erzielbare Punktzahl beträgt 13 Punkte. Hohe Punktzahlen bedeuten eine hohe Umsetzungsrelevanz.

#### 7.1.1 Umweltrelevanz

Die Beurteilung der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Behandlungsanforderungen erfolgte auf Grundlage der Erkenntnisse aus Literaturquellen, aus den AK- und AG-Treffen und der Ergebnisse der begleitenden Forschungsvorhaben. Dabei wurde bewertet, ob die Behandlungsanforderung dazu beiträgt, Materialfraktionen und Stoffströme zu erzeugen, die insbesondere

- ▶ gefährliche Schadstoffe aus dem Recyclingkreislauf ausschleusen bzw. ihre Emission in die Umwelt vermindern und/oder
- ▶ zur Ressourcenschonung durch die Gewinnung von Sekundärrohstoffen beitragen
- ▶ bzw. ob ein Versorgungsrisiko besteht.

Es wurden neben Schadstoffaspekten auch nicht-schadstoffbedingte Gesundheits- und Arbeitsschutzabwägungen bei der Punktevergabe berücksichtigt.

Es wurde eine Punkteskala

- ▶ von 0 Punkte: kein ökologischer Nutzen
- ▶ bis 6 Punkte: hoher ökologischer Nutzen durch die Behandlungsanforderung oder notwendiger vorheriger Behandlungsschritte und der ermöglichten Folgebehandlung unter Berücksichtigung der Schadstoff-/Ressourcenmengen zugrunde gelegt.

### **7.1.2 Wirtschaftlichkeit (Aufwand/Erlösmöglichkeiten)**

Das Wertschöpfungspotenzial der durch die Behandlungsanforderung erhaltenen Materialfraktionen und Stoffströme wurde durch Praxispartner innerhalb der AGs und weiteren Untersuchungen ermittelt. Dabei wurden Erlöse aus den gewonnenen Materialfraktionen und durch die weitere Behandlung zu gewinnender Materialfraktionen sowie zu erwartende Kosten einer Umsetzung der Behandlungsanforderung berücksichtigt. Es wurde eine Punkteskala

- ▶ von 0 Punkte: mit zusätzlichen Kosten verbunden
- ▶ bis 3 Punkte: erhebliche Netto-Erlöse durch die gewonnenen Materialfraktionen erzielbar zugrunde gelegt.

### **7.1.3 Umsetzbarkeit**

Als Grundlage zur Beurteilung der Umsetzbarkeit dienten Erkenntnisse über die derzeit verfügbare Technologie und den technischen Aufwand der Umsetzung der Behandlungsanforderung. Es wurde dabei berücksichtigt, ob die Anforderung bereits aktuell in den oder einem Teil der Behandlungsanlagen umgesetzt ist. Es wurde eine Punkteskala

- ▶ von 0 Punkte: derzeit technisch nicht umsetzbar
- ▶ bis 3 Punkte: eine Umsetzung der Behandlungsanforderung ist technisch leicht möglich und/oder findet in vielen Behandlungsanlagen bereits statt

für die Beurteilung zugrunde gelegt.

### **7.1.4 Vergleichbare Anforderungen**

Für jede Behandlungsanforderung wurde überprüft, ob bereits vergleichbare Regelungen existieren. Es wurden dafür die CENELEC-Normen sowie die gesetzlichen Regelungen in Österreich und der Schweiz untersucht. Existierten dort vergleichbaren Regelungen wurde 1 Punkt, ansonsten 0 Punkte vergeben.

### **7.1.5 Effekte der Regelung**

Zur Beurteilung der positiven Effekte durch Inkrafttreten der Regelung wurden Mengen und erwartete Mengen der entfrachteten Schadstoffe und der separierten Wertstoffe betrachtet. Es wurden dabei lediglich zusätzlich Schadstoffentfrachtung und Wertstoffseparierung im Verhältnis zur derzeitigen Rechtslage und Praxis einbezogen. Es wurde eine Punkteskala

- ▶ von 0 Punkte: keine zusätzliche Schadstoffentfrachtung/Wertstoffseparierung

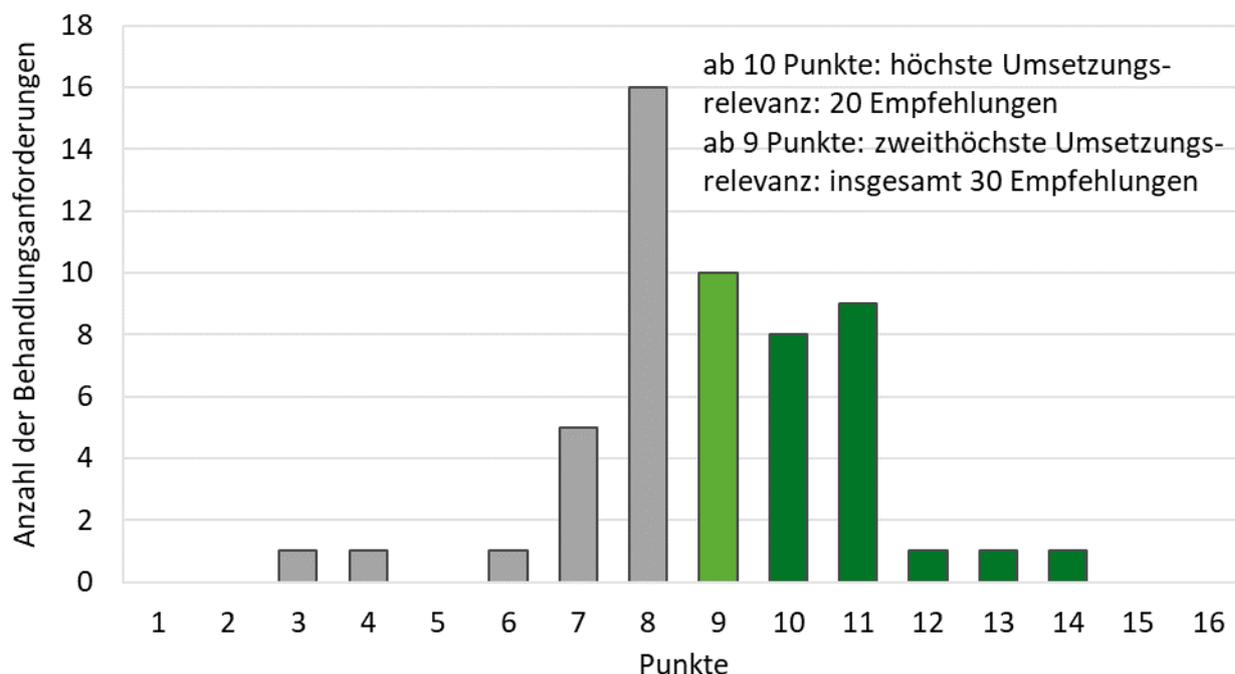
- ▶ bis 3 Punkte: Schadstoffentfrachtung/Wertstoffseparierung in großen zusätzlichen Mengen oder eines derzeit nicht entfrachteten/separierten Stoffes wird durch die Behandlungsanforderung umgesetzt.

für die Beurteilung zugrunde gelegt.

## 7.2 Reihung

Die Reihung der 54 Behandlungsanforderungen nach den oben genannten Kriterien ergab die in Abbildung 22 dargestellte Punkteverteilung. Die durchschnittliche Punktzahl der Behandlungsanforderungen betrug 9 Punkte.

**Abbildung 22: Punkteverteilung nach Reihung**



Die 30 Behandlungsanforderungen mit einer Punktezahl von 9 oder mehr Punkten werden als prioritär angesehen, die 20 Behandlungsanforderungen mit einer Punktezahl von 10 oder mehr als höchste Priorität für die Umsetzung. Die 30 Behandlungsanforderungen mit den höchsten Punktezahlen sind in Tabelle 38, die vollständige Punkteverteilung ist in Anhang A.2 aufgeführt.

**Tabelle 38: Liste der 30 Behandlungsanforderungen (ab 10 Punkte TOP 20) mit den höchsten Punktezahlen**

Behandlungsanforderung		Gesamt
Nr.	Beschreibung	
42	Grenzwert von max. xxxx ppm bromierten Flammschutzmittel in Kunststoffen	14
38	Quoten zur werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen aus EAG je Kategorie	13
18	Keine Verwertung des CRT-Glases als Baumaterial	12
1+2	Leiterplattenseparation vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung	11
7	Separation SE-haltiger Magneten aus Festplatten und Pedelecs	11
10	BSG: Erfassung des Staubes und Quecksilbers am Entstehungspunkt	11
12	Separation von CRT-Geräterückwänden vor mechanischer (Grob-) Zerkleinerung	11
30-32	PV-Module: Getrennte Behandlung, Grenzwerte für Pb, Cd und Se, keine Vermischung / Verdünnung schadstoffhaltiger PV-Fraktionen	11
33	Vorrangige Verwertung von Glas aus PV-Modulen als Flach- oder Behälterglas	11
43	Separation von Kunststoffteilen mit durch POP-VO geregelten Flammschutzmitteln	11
46	Zerstörungsfreie Separation nicht zugänglichen Batterien	11
55	Grenzwert 50 mg PCB / kg in der feinsten NMRF und Staubfraktion	11
8	Kein Abkippen der BSG aus dem Container, mind. Abstellen des Containers	10
22	Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten u. werkstoffliche Verwertung	10
28	Keine Vermischung der PV-Module mit Bauabfällen	10
35	Werkstoffliche Verwertung von Al aus PV-Modulbehandlung	10
44	Separation des Quecksilbers aus dental-medizinischen EAG	10
48	Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro Tonne des Inputs Kat. 5 + Kat. 6	10
50	Separation von Tonerkartuschen, Farbtonern, Resttonerauffangbehältern	10
56	Mindestmengen für die Separation von Kondensatoren aus EAG	10
4	Kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung	9
5	Abgabe separierter Leiterplattenfraktionen und edelmetallhaltiger schadstoffentfrachteter EAG	9
9	Witterungsgeschützte Lagerung von CRT-/FBS-Geräten	9
14	Werkstoffliche Verwertung min. 25 Gew.-% des CRT-Geräteinputs	9

Behandlungsanforderung		Gesamt
Nr.	Beschreibung	
19	Erzeugung einer separaten Lampenfraktion bei FBS-Geräten mit Hg-Hintergrundbeleuchtung	9
21	Lagerung von Lampenbruch aus FBS-Geräten in dicht verschlossenen Gebinden	9
23	Max. 0,5 mg Quecksilber / kg für alle Fraktionen aus FBS-Geräten	9
27	Witterungsgeschützte Lagerung der PV-Module	9
36	2030: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von In und Ga aus PV-Modulen	9
57	Separation von BeO-haltigen Bauteilen aus gewerblichen Geräten	9

## 8 Quellenverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (November 2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Verfügbar auf: <https://www.bmu.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-ii-programm-zur-nachhaltigen-nutzung-und-zum-schutz-der-natue/>. Zugriff 20.02.2020.
- [2] SENS / Swico Recycling (2011): Technische Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Verfügbar auf: [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/sens\\_swico-\\_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf.download.pdf/sens\\_swico-\\_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/fachinfo-daten/sens_swico-_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf.download.pdf/sens_swico-_technischevorschriftenzurentsorgungvonelektro-undel.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [3] Der Schweizerische Bundesrat (2013): Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG). Verfügbar auf: [https://www.admin.ch/ch/d/gg/pc/documents/2124/VREG\\_Entwurf\\_de.pdf](https://www.admin.ch/ch/d/gg/pc/documents/2124/VREG_Entwurf_de.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [4] Nunweiler, E. (2016): Informationen zur Schadstoff- und Ressourcenrelevanz von Werkstoffen und Bauteilen von EAG. Umweltbundesamt, Dokumentationen 05/2016. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/informationen-zur-schadstoff-ressourcenrelevanz-von>. Zugriff 04.03.2020.
- [5] LAGA (2009): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31: Anforderungen zur Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten.
- [6] LAGA (2017): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 A: Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes - Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Verfügbar auf: [https://www.laga-online.de/documents/m-31-a\\_1517834714.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m-31-a_1517834714.pdf). Zugriff 04.03.2020.
- [7] LAGA (2018): Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 31 B: Umsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes - Technische Anforderungen an die Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Verfügbar auf: [https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu\\_1527151713.pdf](https://www.laga-online.de/documents/m-31b-18-04-2018-neu_1527151713.pdf). Zugriff 04.03.2020.
- [8] European Commission (24. Januar 2013): M/518 EN - Mandate to the European Standardisation Organisations for Standardisation in the Field of Waste Electrical and Electronic Equipment (Directive 2012/19/EU (WEEE)). Verfügbar auf: <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/m518%20EN.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [9] Wolf, J., Brüning, R., Nellesen, L., und Schiemann, J. (2016): Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Umweltbundesamt. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/anforderungen-an-die-behandlung-spezifischer>. Zugriff 20.02.2020.
- [10] Sander, K., Otto, S.J., und Wagner, L. (2018): Behandlung von EAG unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. UBA-Texte 31/2018. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/behandlung-von-elektroaltgeraeten-eag-unter> . Zugriff 04.03.2020.
- [11] N.N. (2017): Mündliche Information eines Entsorgungsfachbetriebs bei einem Telefongespräch mit dem UBA am 10.10.2017.
- [12] Sander, K., Schilling, S., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., Gries, N.v., et al. (2012): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten - Meilensteinbericht. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl (UFOPLAN) FKZ 3711 95 318. Verfügbar auf: [http://www.oekopol.de/archiv/material/603\\_RePro\\_Meilensteinbericht\\_1.pdf](http://www.oekopol.de/archiv/material/603_RePro_Meilensteinbericht_1.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [13] ESG Edelmetalle Scheideanstalt.de (Zugriff am 04.10.2017): Recycling von Leiterplattenschrott. Verfügbar auf: <https://www.scheideanstalt.de/leiterplatten-recycling/>.

- [14] Blaser, F., Castelanelli, S., Wäger, P., und Widmer, R. (2012): Seltene Metalle in elektro- und Elektronikaltgeräten - Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien. BAFU - Bundesamt für Umwelt Bern.
- [15] Vanthournout, K., Gerard, H., Virag, A., Ectors, D., Bogaert, S., et al. (2017): Ecodesign Preparatory study on Smart Appliances (Lot 33) MEERP Tasks 1-6, Final Report. Study accomplished under the authority of the European Commission DG Energy Specific contract no. EN-ER/C3/2012-418-LOT1/08/FV2014-55 under Framework Contract ENER/C3/2012-418-LOT1. Verfügbar auf: [https://ecosmartappliances.eu/sites/ecosmartappliances/files/downloads/Ecodesign%20Preparatory%20Study%20on%20Smart%20Appliances%20\\_Tasks%201%20to%206.pdf](https://ecosmartappliances.eu/sites/ecosmartappliances/files/downloads/Ecodesign%20Preparatory%20Study%20on%20Smart%20Appliances%20_Tasks%201%20to%206.pdf). Zugriff 04.03.2020.
- [16] Europäische Kommission (13.9.2017): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Liste kritischer Rohstoffe für die EU 2017. COM(2017) 490 final, Brüssel, Verfügbar auf: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/DE/COM-2017-490-F1-DE-MAIN-PART-1.PDF>. Zugriff 20.02.2020.
- [17] Sander, K., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., Hobohm, J., Hartfeil, T., Schöps, D., Heymann, R. (2019): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro) - Abschlussbericht. Im Auftrag des Umweltbundesamtes; Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abfallwirtschaftliche-produktverantwortung-unter>. Zugriff 04.03.2020.
- [18] Chancerel, P., Rotter, V.S., und Bolland, T. (2010): Stand der Erstbehandlung für Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland und Auswirkung auf die Rückgewinnung von Edelmetallen. Recycling und Rohstoffe, Band 3: S. 627-639.
- [19] Salhofer, S., Spitzbart, M., Schöps, D., Meskers, C., Kriegl, M., et al. (2009): Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Wertstoffen aus Elektroaltgeräten. Brennpunkt ElektroG. Beiträge zur Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 62: S. 23-29.
- [20] Ueberschaar, M., Geiping, J., Zamzow, M., Flamme, S., und Rotter, V.S. (2017): Assessment of element-specific recycling efficiency in WEEE pre-processing. Resources, Conservation and Recycling, 124: S. 25-41.
- [21] Manhart, A., Buchert, M., Degreif, S., Mehlhart, G., und Meinel, J. (2015): Recycling of Hard Disk Drives – Analysing the optimal dismantling depth for recyclers in developing countries and emerging economies. Global Circular Economy of Strategic Metals - the Best-of-two-Worlds Approach (Bo2W). Verfügbar auf: <https://www.oeko.de/en/publications/p-details/recycling-of-hard-disk-drives-analysing-the-optimal-dismantling-depth-for-recyclers-in-developing/>. Zugriff 20.02.2020.
- [22] Europäische Kommission (2.12.2015): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. COM(2015) 614 final, Brüssel.
- [23] Böni, H., Wäger, P., Thiébaud, E., Du, X., Figi, R., et al. (2015): Projekt E-Recmet—Rückgewinnung von Kritischen Metallen Aus Elektronikschrott Am Beispiel von Indium Und Neodym. Schlussbericht [Project e-Recmet–Recovery of critical metals from e-waste, the example of indium and neodymium. Final report], Bericht 2.1. Verfügbar auf: [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/rueckgewinnung\\_vonkritischenmetallenauelektronikschrottambeispi.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/rueckgewinnung_vonkritischenmetallenauelektronikschrottambeispi.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [24] Böni, H. und Widmer, R. (2011): Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz. Schlussbericht. St. Gallen: Empa.
- [25] Cryan, J., Freegard, K., Morrish, L., und Myles, N. (2010): Demonstration of flat panel display recycling technologies. WRAP2010.
- [26] Fröhlich, H. (2015): Recycling von LCD-Bildschirmgeräten. Recycling und Rohstoffe, Band 8: S. 313-324.
- [27] WEEELABEX (13.06.2017): Tabelle „WEEELABEX – Temporary limit values for benchmarks“ übermittelt per E-Mail durch einen Mitarbeiter eines Recyclingunternehmens.
- [28] Chancerel, P. (15.01.2009): Substance flow analysis of the recycling of small end-of-life electronic products in Germany and in the USA - Case studies: Gold and Palladium. Präsentation in der TU Berlin.

- [29] CENELEC (2017): European Standards for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) - Broschüre. Verfügbar auf: <https://www.cencenelec.eu/news/publications/Publications/WEEE-brochure.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [30] Europäische Kommission (30.6.2016): Durchführungsbeschluss (EU) 2016/1032 der Kommission vom 13. Juni 2016 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates für die Nichteisenmetallindustrie.
- [31] Reuter, M.A., Hudson, C., van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., et al. (2013): Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP - United Nations Environment Programme. Verfügbar auf: [http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8423/Metal\\_Recycling-FReport.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8423/Metal_Recycling-FReport.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Zugriff 20.02.2020.
- [32] Destatis (2017): Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1 - 2015.
- [33] Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.-P., Reck, B.K., Sibley, S.F., et al. (2011): Recycling Rates of Metals - A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. UNEP - United Nations Environment Programme. Verfügbar auf: <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>. Zugriff 20.02.2020.
- [34] Nuss, P. und Eckelman, M.J. (2014): Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. PLoS One, 9(7): S. e101298.
- [35] Schrott 24 (2017): Ankaufpreise Aluminium. Verfügbar auf: <https://www.schrott24.de/altmetall-ankauf/aluminium/>. Zugriff 2017.
- [36] Sander, K., Gößling-Reisemann, S., Zimmermann, T., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., et al. (2017): Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra). Umweltbundesamt, Texte 68/2017. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/recyclingpotenzial-strategischer-metalle-restra>. Zugriff 20.02.2020.
- [37] Rujanavech, C., Lessard, J., Chandler, S., Shannon, S., Dahmus, J., et al. (2016): Liam - An Innovation Story. Verfügbar auf: [https://www.apple.com/environment/pdf/Liam\\_white\\_paper\\_Sept2016.pdf](https://www.apple.com/environment/pdf/Liam_white_paper_Sept2016.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [38] Proceedings of the European Metallurgical Conference – EMC 2017 (Juni 2017): Can recycling of NdFeB magnets be expected in Europe before 2030? Leipzig.
- [39] Westphal, L. und Kuchta, K. (2012): Recyclingverfahren gesucht. Recycling-Magazin, 13/2012: S. 30-33.
- [40] Buchert, M., Manhart, A., und Sutter, J. (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Im Auftrag des Landes Baden-Württemberg. Verfügbar auf: <https://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [41] ZIV (2017): Pressemitteilung: Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen E-Bike-Markt 2016. Zweirad-Industrie-Verband e.V. Verfügbar auf: [http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM\\_2017\\_07.03.\\_E-Bike-Markt\\_2016.pdf](http://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PM_2017_07.03._E-Bike-Markt_2016.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [42] Zeller, T., Birkenfeld, S., Keich, O., Nawothnig, B., und Seelig, J.H. (2016): Demontagefabrik im urbanen Raum – Konzeption und Planung. Im Auftrag des Landes Baden-Württemberg: S. 58. Verfügbar auf: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/119568/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=119568&MODE=METADATA>. Zugriff 20.02.2020.
- [43] Zepf, V. (2015): Das verkannte Recyclingpotenzial der Seltenen Erden – Quantitative Ergebnisse für Neodym in Deutschland. Recycling und Rohstoffe, 8: S. 463-476.
- [44] Stiftung ear (September 2017): Präsentation der stiftung ear auf dem Workshop „2018“ der stiftung elektro-altgeräte register in Fürth. Verfügbar auf: [https://www.stiftung-ear.de/fileadmin/download/DL-Workshop-ElektroG2018\\_201709.pdf](https://www.stiftung-ear.de/fileadmin/download/DL-Workshop-ElektroG2018_201709.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [45] Apple (2017): Environmental Responsibility Report. 2017 Progress Report, Covering Fiscal Year 2016. Verfügbar auf: [https://images.apple.com/environment/pdf/Apple\\_Environmental\\_Responsibility\\_Report\\_2017.pdf](https://images.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Responsibility_Report_2017.pdf). Zugriff 20.02.2020.

- [46] Bast, U., Blank, R., Buchert, M., Elwert, T., Finsterwalder, F., et al. (2014): Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtriebwerken. Kennwort MORE (Motor Recycling). Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Verfügbar auf: [https://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Dokumente\\_News\\_ETC/MORE\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Dokumente_News_ETC/MORE_Abschlussbericht.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [47] Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., et al. (2014): Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environmental Science and Technology*, 48: S. 3951-3958.
- [48] Nemoto, T., Tanaka, Y., Tsujioka, S., Eryó, Y., und Takada, T. (2011): Resource Recycling for Sustainable Industrial Development. *Hitachi Review*, 60(6).
- [49] Hein Schrotthandel GmbH: Schrottpreise Leiterplatten, Prozessoren, Chips. Verfügbar auf: <http://www.hein-schrotthandel.de/schrottpreise/leiterplatten-prozessoren-chips/>. Zugriff 12.02.2018.
- [50] TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) (2015): Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologiekette für NdFeB-Magnete (SEMAREC). Verfügbar auf: <https://www.ifa.tu-clausthal.de/lehrstuehle/lehrstuhl-fuer-rohstoffaufbereitung-und-recycling/forschung/abgeschlossene-projekte-auswahl/semarec/>. Zugriff 20.02.2020.
- [51] FME Freiburger Metallrecycling und Entwicklungsdienstleistungen GmbH (2016): Projektvorstellung MagnetoRec: Recycling Seltener Erden aus FeNdB-Dauermagneten mittels Feststoffchlorierung. Verfügbar auf: <http://fme-metallrecycling.de/magnetorec/>. Zugriff 20.02.2020.
- [52] Fraunhofer IWKS (03.08.2017): Pressemitteilung: RECVAl-HPM Projekt erfolgreich beendet. Verfügbar auf: <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemitteilungen-2017/RECVAl-HPp.html>. Zugriff 20.02.2020.
- [53] (2017): REMANENCE FP7 - Rare Earth Magnet Recovery for Environmental and Resource Protection. Verfügbar auf: <http://www.project-remanence.eu/>.
- [54] Gefördert durch die EU im Programm Horizon 2020 (2017): ReProMag – Resource Efficient Production of Magnets. Verfügbar auf: <http://www.repromag-project.eu/>. Zugriff 20.02.2020.
- [55] EREAN (2013): EREAN - European Rare Earth (Magnet) Recycling Network. Gefördert im Rahmen des 7. Forschungsrahmenprogramms der EU FP 7 Marie-Curie Initial Training Network. Verfügbar auf: <https://cordis.europa.eu/project/id/607411/de>. Zugriff 20.02.2020.
- [56] Umweltbundesamt (2017): Daten zur Umwelt. Verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bildschirme-lampen#textpart-1>. Zugriff 20.02.2020.
- [57] BiPRO (2006): Verwertungsmöglichkeiten von Bildröhrenglas aus der Demontage von Elektroaltgeräten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich. Verfügbar auf: [https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/elektroaltgeraete/eag\\_studien.html](https://www.bmnt.gv.at/umwelt/abfall-ressourcen/elektroaltgeraete/eag_studien.html). Zugriff 20.02.2020.
- [58] Prakash, S., Brommer, E., und Gröger, J. (2011): PROSA Computerbildschirme - Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. Studie im Rahmen des Projekts "TOP 100 - Umweltzeichen für klimarelevante Produkte", Öko-Institut e.V. Verfügbar auf: <https://www.oeko.de/oekodoc/1347/2011-455-de.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [59] Hertel, D., Müller, C.D., und Meerholz, K. (2005): Organische Leuchtdioden: Bilderzeugung. *Chemie in unserer Zeit*, 39(5): S. 336-347.
- [60] Fischer, W., (2010): Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in Theorie und Praxis: MPEG-Basisbandcodierung, DVB-, DAB-, ATSC-, ISDB-T-Übertragungstechnik, Messtechnik. Springer-Verlag.
- [61] CEMIX (2015): Consumer Electronics Marktindex Deutschland (CEMIX), Januar 2015 - Dezember 2015. Verfügbar auf: <http://www.gfu.de/fileadmin/media/downloads/CEMIX-Q1-Q4-2015.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [62] Eckstein, K., Walter, G., und Flamme, S. (2013): Zukünftiges Aufkommen an Flachbildschirm-Altgeräten für die Ressourcenrückgewinnung. *Müll und Abfall*, 4(13): S. 205.

- [63] Widmer, R. (2016): Künftige Entsorgung von Bildröhrengeräten in der Schweiz. Stiftung SENS, Swico, Stiftung Licht Recycling Schweiz (SLRS), Fachbericht 2016. Verfügbar auf: [https://www.swico.ch/media/filer\\_public/c8/20/c820520a-1573-4cb5-bed8-2a19c8019d72/fachbericht\\_swico\\_sens\\_slrs\\_2016\\_2.pdf+&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=de&client=firefox-b-d](https://www.swico.ch/media/filer_public/c8/20/c820520a-1573-4cb5-bed8-2a19c8019d72/fachbericht_swico_sens_slrs_2016_2.pdf+&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=de&client=firefox-b-d). Zugriff 20.02.2020.
- [64] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015): Stoffeinträge im Umfeld von Recyclinganlagen - Messungen von 2013 und 2014. 33-12/2015.
- [65] Blauth, F., Prause, H.J., Schiemann, B., Schiemann, J., und Walter, E. (2011): Handbuch: Verwertung von LCD-Geräten. Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA). Verfügbar auf: [http://www.veu.de/index.php?article\\_id=190&clang=0&file\\_id=381](http://www.veu.de/index.php?article_id=190&clang=0&file_id=381). Zugriff 20.02.2020.
- [66] Krukenberg, N. (2010): Challenges and conditions in the collection, transport and treatment chain of LCD displays. IERC 2010, Salzburg.
- [67] Wehde, J., Hebisch, R., Ott, G., Maschmeier, C.-P., und Fendler, D. (2011): Handlungsanleitung zur guten Arbeitspraxis „Elektronikschrottreycling – Tätigkeiten mit Gefahrstoffen bei der manuellen Zerlegung von Bildschirm- und anderen Elektrogeräten“. Regierungspräsidium Kassel. Verfügbar auf: [https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Kooperation/Elektronikschrottreycling.pdf;jsessionid=27885A4ABF01DB8BC2C3B71597494DBA.s2t1?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Kooperation/Elektronikschrottreycling.pdf;jsessionid=27885A4ABF01DB8BC2C3B71597494DBA.s2t1?__blob=publicationFile&v=4). Zugriff 20.02.2020
- [68] DGUV (2016): Expositionsbeschreibung - Quecksilberexpositionen beim Recycling von Leuchtmitteln. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Verfügbar auf: [http://www.dguv.de/medien/ifa/de/prae/quecksilber/expositionsbeschreibung\\_recycling.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/prae/quecksilber/expositionsbeschreibung_recycling.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [69] Peeters, J.R., Vanegas, P., Devoldere, T., Dewulf, W., und Duflou, J.R. (2012): Closed loop recycling of plastic housing for flat screen TVs. Electronics Goes Green 2012+(EGG): S. 1-6.
- [70] Salhofer, S., Spitzbart, M., und Maurer, K. (2012): Recycling of flat screens as a new challenge. Waste and Resource Management, 165(1): S. 37 - 43.
- [71] Taverna, R., Gloor, R., Maier, U., Zennegg, M., Figi, R., et al. (2017): Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott. Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel und polychlorierte Biphenyle in elektrischen und elektronischen Kleingeräten. Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Zustand Nr. 1717.
- [72] Wäger, P., Schlupe, M., und Müller, E. (2010): RoHS substances in mixed plastics from waste electrical and electronic equipment. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa).
- [73] Diederich, D. und Daniel, J. (2011): Verwertungsmöglichkeiten von aufbereiteten Bildröhrengläsern - Stoffliches Recycling, Scherbenmangel der weltweiten Glasindustrie. Verfügbar auf: <http://docplayer.org/11946053-Verwertungsmoeglichkeiten-von-aufbereiteten-bildroehrenglaesern-stoffliches-recycling-scherbenmangel-der-weltweiten-glasindustrie.html>. Zugriff 20.02.2020.
- [74] Bleher, D. (2014): Global Circular Economy of Strategic Metals - the Best-of-two-Worlds Approach (Bo2W): Recycling options for waste CRT glass. Öko-Institut e.V. Verfügbar auf: <https://www.oeko.de/oekodoc/2061/2014-635-en.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [75] Thullner, I., Buchwald, K.-E., Wegscheider, W., und Hohenberger, L. (2013): Quecksilberemissionen bei der Sammlung und Entsorgung von Leuchtmitteln. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 73(Nr. 1/2): S. 14 - 24. Verfügbar auf: [http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2013\\_002.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2013_002.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [76] Tesar, M. und Öhlinger, A. (2012): Flachbildschirmgeräte. Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich. Umweltbundesamt Österreich, Report REP-0384.
- [77] R'09 Twin World Congress & World Resources Forum, Davos, Switzerland (2009): Recycling of plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) –tentative results of a Swiss study.
- [78] Plastics Europe: Informationszentrum Ökoprofile. Verfügbar auf: <http://www.plasticseurope.org/de/resources/eco-profiles>. Zugriff 20.02.2020.
- [79] European Flame Retardants Association (2013): Recycling of Plastics from LCD Television sets. Verfügbar auf: [http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user\\_upload/RoHS\\_Substance\\_Review/Substance\\_Profiles/20140404\\_Antimony\\_EFRA\\_2013.pdf](http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Substance_Review/Substance_Profiles/20140404_Antimony_EFRA_2013.pdf). Zugriff 20.02.2020.

- [80] Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D., und Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. LANUV-Fachbericht 38, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Verfügbar auf: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3\\_fachberichte/30038.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30038.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [81] Wittmer, D., Erren, M., Lauwigi, C., Ritthoff, M., und Dressler, C. (2011): Umweltrelevante metallische Rohstoffe, Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess), Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Ressourceneffizienz Paper 2.2. Verfügbar auf: [https://epub.wupperinst.org/files/3971/MaRess\\_AP2\\_2.pdf](https://epub.wupperinst.org/files/3971/MaRess_AP2_2.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [82] USGS (2018): Mineral Commodity Summaries. Indium. U.S. Geological Survey. Verfügbar auf: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/>. Zugriff 20.02.2020.
- [83] Beckmann, J. (2012): Wieso Abfall? Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen. Installateur, 02.12: S. 28 - 31.
- [84] Fiedler, R. (2016): Recycling von PV-Modulen. SolarWorld AG. Verfügbar auf: [https://crm.saena.de/sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/2\\_Fiedler\\_Solarworld\\_PV%20Modul%20Recycling.pdf](https://crm.saena.de/sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/2_Fiedler_Solarworld_PV%20Modul%20Recycling.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [85] Universität Stuttgart (18.11.2014): Presseinfo: Schadstoffe aus Photovoltaik-Modulen. Nr. 84, Verfügbar auf: [https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/presseinfo/Schadstoffe\\_aus\\_Photovoltaik-Modulen/](https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/presseinfo/Schadstoffe_aus_Photovoltaik-Modulen/). Zugriff 20.02.2020.
- [86] Wade, A. (2010): FAQ Calyxo CdTe Photovoltaik - Faktenkatalog zur Produkt- und Technologiekommunikation. calyxo. Verfügbar auf: [http://calyxo.freigabeserver.com/medien\\_cdte/nachhaltigkeit/pas11050102de.pdf](http://calyxo.freigabeserver.com/medien_cdte/nachhaltigkeit/pas11050102de.pdf).
- [87] IRENA und IEA-PVPS (2016): End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- [88] Fraunhofer IBP; Department Life Cycle Engineering (GaBi) (June 2012): Executive Summary, Life Cycle Assessment (LCA) screening of the Maltha recycling process for Si-PV modules. Verfügbar auf: <http://www.pvcycle.org.uk/wp-content/uploads/Exec-Summary-LCA-Screening-of-a-Recycling-process-of-silicon-based-PV-modules-2012-07.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [89] Blengini, G.A., Busto, M., Fantoni, M., und Fino, D. (2012): Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. Waste management, 32(5): S. 1000-1008.
- [90] BDE, bvse, und BVGlas (2014): Leitlinie "Qualitätsanforderungen an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie". Standardblatt T 120, Bundesverband Glasindustrie e.V., Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V., Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. Verfügbar auf: <https://bde.de/assets/public/Dokumente/2015/Standardblatt-T-120-2014-08-14.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [91] Kernbaum, S. und Hübner, T. (2013): Recycling von Photovoltaikmodulen. Recycling und Rohstoffe, 6. Verfügbar auf: [http://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR6/2013\\_RuR\\_545\\_558\\_Kernbaum.pdf](http://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR6/2013_RuR_545_558_Kernbaum.pdf)
- [92] Marwede, M. (2013): Cycling critical absorber materials of CdTe-and CIGS-photovoltaics: Material efficiency along the life-cycle. Universität Augsburg, Dissertation.
- [93] Sander, K., Schilling, S., Wambach, K., Schlenker, S., Müller, A., et al. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystem für Photovoltaische Produkte. Verfügbar auf: [http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12655/pdf/Gesamtbericht\\_PVCycle\\_de.pdf](http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12655/pdf/Gesamtbericht_PVCycle_de.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [94] alu.ch (Abgerufen am 12.02.2018): Recycling von Aluminium. Verfügbar auf: <http://alu.ch/werkstoff/recycling/>. Zugriff 20.02.2020.
- [95] USGS (2018): Mineral Commodity Summaries. Gallium. U.S. Geological Survey. Verfügbar auf: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/>. Zugriff 20.02.2020.
- [96] USGS (2018): Mineral Commodity Summaries. Silizium. U.S. Geological Survey. Verfügbar auf: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silicon/>. Zugriff 20.02.2020.
- [97] Consultic (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015.

- [98] Baxter, J., Wahlstrom, M., Zu Castell-Rüdenhausen, M., Frâne, A., Stare, M., et al. (2014): Plastic value chains - Case: WEEE (Waste Electric and electronic equipment) in the Nordic region. Nordic Council of Ministers.
- [99] Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME) (2001): Plastics: Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000.
- [100] Huisman, J., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Ogilvie, S., et al. (2007): 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). United Nations University, Study No. 07010401/2006/442493/ETU/G4.
- [101] Buekens, A. und Yang, J. (2014): Recycling of WEEE plastics: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(3): S. 415-434.
- [102] Wilts, H., Gries, N.v., Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Buschow, N., et al. (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen - mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. Umweltbundesamt, Texte 65/2016.
- [103] BMUB (Zugriff am 05.02.2018): Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland: Daten 2015 zur Erfassung, Behandlung und Vorbereitung zur Wiederverwendung. Verfügbar auf: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete\\_daten\\_2016\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete_daten_2016_bf.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [104] Delgado, C., Barruetabena, L., und Salas, O. (2007): Assessment of the Environmental Advantages and Drawbacks of Existing and Emerging Polymers Recovery Processes. JRC Scientific and Technical Reports.
- [105] Schüler, D. und Sutter, J. (2016): Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten. Update 2016. Öko-Institut e.V.
- [106] Dehoust, G. und Schüler, D. (2007): Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten. Im Auftrag der RAL Gütegemeinschaft Rückproduktion von FCKW-haltigen Kühlgeräten e.V.
- [107] Martinho, G., Pires, A., Saraiva, L., und Ribeiro, R. (2012): Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. *Waste Management*, 32(6): S. 1213-1217.
- [108] Crowe, M., Elser, A., Göpfert, B., Mertins, L., Meyer, T., et al. (2003): Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) - quantities, dangerous substances and treatment methods. European Environment Agency.
- [109] Österreich (2007): Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH - Tätigkeitsbericht 2006.
- [110] Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., und Gidarakos, E. (2009): Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2): S. 913-919.
- [111] Wäger, P., Hischier, R., und Eugster, M. (2011): Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A follow-up. *Science of the Total Environment*, 409(10): S. 1746-1756.
- [112] Wäger, P.A. und Hischier, R. (2015): Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Science of the Total Environment*, 529: S. 158-167.
- [113] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2009): Entsorgung FCKW-haltiger Haushaltskühlgeräte in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 21.
- [114] Novak, E. (2001): Verwertungsmöglichkeiten für ausgewählte Fraktionen aus der Demontage von Elektroaltgeräten - Kunststoffe. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich, ofi Kunststoffinstitut (Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik). Verfügbar auf: <https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:de9e372a-76a9-4000-9d0d-d4a33286ac8b/eagkunst.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [115] Jokic, G. und Dortmann, D. (2015): Rohstoffpotenziale weißer Ware am Beispiel des Kühlschranks-Recyclings. *Recycling und Rohstoffe*, 8: S. 297-312.
- [116] Stenvall, E., Tostar, S., Boldizar, A., Foreman, M.R.S., und Möller, K. (2013): An analysis of the composition and metal contamination of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Waste management*, 33(4): S. 915-922.

- [117] Mitro, S.D., Dodson, R.E., Singla, V., Adamkiewicz, G., Elmi, A.F., et al. (2016): Consumer product chemicals in indoor dust: a quantitative meta-analysis of US studies. *Environmental Science & Technology*, 50(19): S. 10661-10672.
- [118] Bonn (2003): Bekanntmachung der Neufassung der Chemikalien-Verbotsverordnung. *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2003 Teil I Nr. 26*: S. 867-884.
- [119] Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (13.07.2017): Report of the Conference of the Parties to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants on the work of its eighth meeting. UNEP/POPS/COP.8/32, Geneva, 24.04-05.05.2017.
- [120] Wäger, P.A., Schluep, M., Müller, E., und Gloor, R. (2011): RoHS regulated substances in mixed plastics from waste electrical and electronic equipment. *Environmental science & technology*, 46(2): S. 628-635.
- [121] Leslie, H.A., Leonards, P.E.G., Brandsma, S.H., und Jonkers, N. (2013): POP STREAM - POP-BDE waste streams in the Netherlands: analysis and inventory. A joint IVM-IVAM report. IVM Institute for Environmental Studies, Report R13-16.
- [122] Arends, D., Schlummer, M., Mäurer, A., Markowski, J., und Wagenknecht, U. (2015): Characterisation and materials flow management for waste electrical and electronic equipment plastics from German dismantling centres. *Waste Management & Research*, 33(9): S. 775-784.
- [123] Balde, C.P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Gill, S.F., Kern, M., et al. (2015): E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators. United Nations University, IAS - SCYCLE.
- [124] Umweltbundesamt: Altbatterien. Daten zur Umwelt. Zuletzt aktualisiert am 11.01.2017; verfügbar auf: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#textpart-1>. Zugriff 20.02.2020.
- [125] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (10/2015): Druckerpatronen und Tonerkartuschen. *infoBlätter Kreislaufwirtschaft*.
- [126] Becker, D. (2015): Toner. *Recycling Magazin*, 20: S. 18-19.
- [127] URT Umwelt- und Recyclingtechnik GmbH (04/2017): Tonerkartuschen - Aufbereitungskonzepte. Verfügbar auf: <http://www.urt-recycling.de/seite/de/entsorgung/0179/-/Tonerkartuschen-Recycling.html>.
- [128] Tonner, A. und Hafner, R. (2013): Verwertung von tonerhaltigen Abfällen. *Fachbericht Swico, SENS, SLRS*: S. 19-21.
- [129] Brüning, T. (2006): Bewertung der gesundheitlichen Wirkung von Tonerstäuben für Menschen am Arbeitsplatz. Berufsgenossenschaftliches Forschungsinstitut für Arbeitsmedizin, Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG).
- [130] NANO-CONTROL (Abgerufen am 04.10.2017): Giftige Toner - unfassbare Emissionen. Verfügbar auf: <https://www.nano-control.org/info/giftige-toner-unfassbare-emissionen>. Zugriff 20.02.2020.
- [131] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft Wien (2002): Leitfaden für die Behandlung von Elektro- und Elektronikgeräten.
- [132] Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH (10/2014): Marktrecherche Kochmulden mit Glaskeramik. Schott AG.
- [133] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Künstliche Mineralfasern. *UmweltWissen - Abfall*, Verfügbar auf: [https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_32\\_kuenstliche\\_mineralfasern.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_32_kuenstliche_mineralfasern.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [134] Bonk, L., Böckler, M., Göller, F., Jasny, W., und Tigges, E. (2011): Einsatz, Entsorgung und Recycling PCB-haltiger Bauteile und Komponenten der Elektrotechnik. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 71(1): S. 15-19.
- [135] chemsuisse (2011): Kondensatorenverzeichnis - Erkennung und Entsorgung PCB-haltiger Kondensatoren. Kantonale Fachstellen für Chemikalien, Bundesamt für Umwelt BAFU Schweiz. Verfügbar auf: <http://www.chemsuisse.ch/files/97/DE%20PCB%20Hilfsmittel/80/Verzeichnis.pdf>. Zugriff 20.02.2020.
- [136] BeST : About Beryllium - Facts & Figures. Verfügbar auf: <http://beryllium.eu/about-beryllium/facts-and-figures/>. Zugriff 20.02.2020.

- [137] Knudson, T. (2008): A Qualitative Overview of the Use of Beryllium, Beryllium-Containing Alloys and Beryllium oxide Ceramic in Electrical and Electronic Equipment (EEE). Verfügbar auf: <https://rohs.exemptions.oeko.info/index.php?id=317>. Zugriff 20.03.2020
- [138] Gensch, C.-O., Baron, Y., Blepp, M., Bunke, D., und 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. Öko-Institut e.V. Verfügbar auf: [https://circabc.europa.eu/sd/a/0ee53cdd-5807-4679-a88c-3cabe30162f6/20140806\\_Substance\\_Review\\_revised\\_version\\_final\\_plus\\_Dossier.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/0ee53cdd-5807-4679-a88c-3cabe30162f6/20140806_Substance_Review_revised_version_final_plus_Dossier.pdf). Zugriff 20.02.2020
- [139] NGK Berylco (2014): Beryllium Copper Alloys - Technical Guide. Verfügbar auf: [http://www.ngk-alloys.com/de/NGK\\_Berylco\\_Design\\_Guide\\_En.pdf](http://www.ngk-alloys.com/de/NGK_Berylco_Design_Guide_En.pdf). Zugriff 20.02.2020.
- [140] Materion (Letzter Zugriff Februar 2018): Kupfer-Beryllium-Legierungen. Verfügbar auf: <https://materion.de.com/die-produkte/legierungen/kupfer-beryllium>.
- [141] Eneh, O.C. (2011): Recyclability potentials of beryllium oxide from E-waste items in Nigeria. *Journal of Applied Sciences*, 11(2): S. 397-400.
- [142] Kaimer, M. und Schade, D., (2000): Abfallentsorgung zu Lasten der Bürger?: Probleme der Kreislaufwirtschaft und Lösungsansätze für eine Entlastung der Haushalte.
- [143] Kurth, P., Oexle, A., und Faulstich, M., (2017): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Springer.
- [144] Nover, J., Huber, S., Zapf-Gottwick, R., Werner, J., Feifel, C., Koch, M., Metzger, J. W. (2018): Schadstofffreisetzung aus Photovoltaik-Modulen. Abschlussbericht: Laufzeit: 01.09.2014-31.08.2017. Universität Stuttgart, Institut für Photovoltaik. Verfügbar auf: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1020510552/>. Zugriff am 27.3.2020
- [145] Enargus.de (2016): Verbundvorhaben: EoL-Cycle - End-of-Life Cycle von PV-Modulen: Aufarbeitung von Altmodulen und Rückführung von Wertstoffen in den Stoffkreislauf; Teilvorhaben: Verbesserte Materialtrennung bei der Aufbereitung von End-of-Life PV-Modulen und qualitätsoptimierte Rückgewinnung der Glas- und Metallfraktion. Verfügbar auf: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=EB1099&m=1&v=10&s=1&id=609203>
- [146] Fraunhofer ISE (2018): EoL – Entwicklung eines industrietauglichen Recycling-Prozesses für PV-Module. Verfügbar auf: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eol.html>

## A Anhang

### A.1 Anlage 4 ElektroG

Die selektive Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen von Altgeräten umfasst nach Anlage 4 des ElektroG:

1. Mindestens folgende Stoffe, Gemische und Bauteile müssen aus getrennt erfassten Altgeräten entfernt werden:
  - a) quecksilberhaltige Bauteile wie Schalter oder Lampen für Hintergrundbeleuchtung;
  - b) Batterien und Akkumulatoren;
  - c) Leiterplatten von Mobiltelefonen generell sowie von sonstigen Geräten, wenn die Oberfläche der Leiterplatte größer ist als 10 Quadratzentimeter;
  - d) Tonerkartuschen, flüssig und pastös, und Farbtoner;
  - e) Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten;
  - f) Asbestabfall und Bauteile, die Asbest enthalten;
  - g) Kathodenstrahlröhren;
  - h) Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKW) oder teilhalogenierte Fluorkohlenstoffe (HFKW), Kohlenwasserstoffe (KW);
  - i) Gasentladungslampen
  - j) Flüssigkristallanzeigen (gegebenenfalls zusammen mit dem Gehäuse) mit einer Oberfläche von mehr als 100 Quadratzentimetern sowie hintergrundbeleuchtete Anzeigen mit Gasentladungslampen;
  - k) externe elektrische Leitungen;
  - l) Bauteile, die feuerfeste Keramikfasern gemäß Anhang VI der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (ABl. L 353 vom 31.12.2008, S. 1), die zuletzt durch die Verordnung (EU) Nr. 286/2011 (ABl. L 83 vom 30.03.2011, S. 1) geändert worden ist, enthalten;
  - m) Bauteile, die radioaktive Stoffe enthalten, ausgenommen Bauteile, die nicht die Freigrenzen nach Artikel 3 sowie Anhang I der Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen (ABl. L 159 vom 29.06.1996, S. 1) überschreiten;
  - n) Elektrolyt-Kondensatoren, die bedenkliche Stoffe enthalten (Höhe größer als 25 Millimeter, Durchmesser größer als 25 Millimeter oder proportional ähnliches Volumen);
  - o) cadmium- oder selenhaltige Fotoleitertrommeln.

Diese Stoffe, Gemische und Bauteile sind gemäß § 15 Absatz 2 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu beseitigen oder zu verwerten. Es ist sicherzustellen, dass schadstoffhaltige Bauteile und Stoffe bei der Behandlung nicht zerstört werden und Schadstoffe nicht in die zu verwertenden Materialströme eingetragen werden. Batterien und Akkumulatoren sind so zu entfernen, dass sie nicht beschädigt werden und nach der Entfernung identifizierbar sind.

2. Bauteile, die radioaktive Stoffe enthalten, sind wie folgt zu behandeln:
  - a) Bauteile, die radioaktive Stoffe enthalten, ausgenommen Bauteile aus Konsumgütern, und die unter einer Genehmigung nach § 106 Absatz 1 der Strahlenschutzverordnung

- vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist, hergestellt oder nach § 108 der Strahlenschutzverordnung verbracht wurden und für die kein Rücknahmekonzept nach § 107 Absatz 1 Nummer 1 Buchstabe a und entsprechend § 109 der Strahlenschutzverordnung erforderlich ist, dürfen ohne weitere selektive Behandlung gemäß § 15 Absatz 2 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes beseitigt oder verwertet werden.
- b) Bauteile wie unter Buchstabe a, für die aber ein Rücknahmekonzept nach § 107 Absatz 1 Nummer 1 Buchstabe a und entsprechend § 109 der Strahlenschutzverordnung gefordert ist, sind vom Letztbesitzer entsprechend § 110 der Strahlenschutzverordnung an die in der Information nach § 107 Absatz 1 Nummer 3 der Strahlenschutzverordnung angegebene Stelle zurückzugeben.
  - c) Alle übrigen Bauteile, die radioaktive Stoffe enthalten, sind unter Berücksichtigung der Strahlenschutzverordnung zu entsorgen.
3. Für Kondensatoren, die polychlorierte Biphenyle (PCB) enthalten, gilt § 2 Absatz 2 Nummer 2 der PCB/PCT-Abfallverordnung.
  4. Die folgenden Bauteile von getrennt erfassten Elektro- und Elektronik-Altgeräten sind wie angegeben zu behandeln:
    - a) Kathodenstrahlröhren: Die fluoreszierende Beschichtung muss entfernt werden.
    - b) Geräte, die Gase enthalten, die ozonabbauend sind oder ein Erderwärmungspotenzial (GWP) über 15 haben, z. B. enthalten in Schäumen und Kühlkreisläufen: Die Gase müssen ordnungsgemäß entfernt und behandelt werden. Ozonabbauende Gase werden gemäß Artikel 22 der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen (ABl. L 286 vom 31.10.2009, S. 1), behandelt.
    - c) Gasentladungslampen: Das Quecksilber muss entfernt werden.
  5. Unter Berücksichtigung des Umweltschutzes und der Tatsache, dass die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling wünschenswert sind, sind die Nummern 1 bis 4 so anzuwenden, dass die umweltgerechte Vorbereitung zur Wiederverwendung und das umweltgerechte Recycling von Bauteilen oder ganzen Geräten nicht behindert wird.
  6. Bei der Aufbereitung von Lampen zur Verwertung ist für Altglas ein Quecksilbergehalt von höchstens 5 Milligramm je Kilogramm Altglas einzuhalten.
  7. Bildröhren sind im Rahmen der Behandlung vorrangig in Schirm- und Konusglas zu trennen.
  8. Gasentladungslampen sich ausreichend gegen Bruch gesichert zu lagern und zu transportieren.

## A.2 Punkteverteilung für die Reihung

**Tabelle 39: Punkteverteilung für die Reihung nach 5 Kriterien**

Behandlungsanforderung		Umweltrelevanz	Wirtschaftlichkeit	Umsetzbarkeit	Vergl. Anforderungen	Positive Auswirkungen	Gesamt
Nr.	Beschreibung						
1+2	Leiterplattenseparation vor mechanischer (Grob-)Zerkleinerung	4	3	2	0	2	<b>11</b>
3	Separation von min. 4 Gew.-% Leiterplatten aus FBS-Geräten	3	2	2	0	1	<b>8</b>
4	Kontinuierliche Verbesserung der Edelmetallrückgewinnung	3	1	3	1	1	<b>9</b>
5	Abgabe separierter Leiterplattenfraktionen und edelmetallhaltiger schadstoffentfrachteter EAG	4	2	1	0	2	<b>9</b>
6	Abtrennung von Aluminium-Kühlkörpern von Leiterplatten	2	1	3	0	1	<b>7</b>
7	Separation SE-haltiger Magneten aus Festplatten und Pedelecs	6	0	2	0	3	<b>11</b>
8	Kein Abkippen der BSG aus dem Container, mind. Abstellen des Containers	6	0	3	1	0	<b>10</b>
9	Witterungsgeschützte Lagerung von CRT-/FBS-Geräten	4	0	3	1	1	<b>9</b>
10	BSG: Erfassung des Staubes und Quecksilbers am Entstehungspunkt	6	0	2	1	2	<b>11</b>
11	Werkstoffliche Verwertung der Kunststoffe von BSG-Rückwänden	4	2	1	0	1	<b>8</b>
12	Separation von CRT-Geräterückwänden vor mechanischer (Grob-) Zerkleinerung	5	1	3	1	1	<b>11</b>
13	Trennung von Konus- und Schirmglas aus CRT-Geräten	4	1	1	0	2	<b>8</b>
14	Werkstoffliche Verwertung min. 25 Gew.-% des CRT-Geräteinputs	4	1	2	0	2	<b>9</b>
15	Max. 5 mg/kg Schwefel in gereinigter CRT-Glasfraktion	3	0	2	1	1	<b>7</b>
16	PbO-Gehalt der Schirmglasfraktion: maximal 0,1 %	3	1	2	1	1	<b>8</b>
17	Grenzwerte für CRT-Glas in sonstigen Fraktionen	1	0	0	1	1	<b>3</b>
18	Keine Verwertung des CRT-Glases als Baumaterial	5	1	3	0	3	<b>12</b>
19	Erzeugung einer separaten Lampenfraktion bei FBS-Geräten mit Hg-Hintergrundbeleuchtung	5	0	2	1	1	<b>9</b>
20	Getrennte Folgebehandlung von FBS-Geräten und Hg-haltigen Lampen	5	0	2	1	0	<b>8</b>
21	Lagerung von Lampenbruch aus FBS-Geräten in dicht verschlossenem Gebinde	4	0	3	1	1	<b>9</b>

Behandlungsanforderung		Umweltrelevanz	Wirtschaftlichkeit	Umsetzbarkeit	Vergl. Anforderungen	Positive Auswirkungen	Gesamt
Nr.	Beschreibung						
22	Separierung der PMMA- und PC-Scheiben von FBS-Geräten u. werkstoffliche Verwertung	5	2	2	0	1	<b>10</b>
23	Max. 0,5 mg Quecksilber / kg für alle Fraktionen aus FBS-Geräten	5	0	2	1	1	<b>9</b>
24	2025: Rückgewinnung des Indiums aus FBS-Geräten	3	1	1	0	3	<b>8</b>
25	PV-Module: Bruch sichere Entladung, Lagerung und Umgang; kein Vorbrechen oder Verdichten	4	0	3	1	0	<b>8</b>
26	Die Gefahr eines Kurzschlusses in PV-Modulen ist auszuschließen	2	0	3	0	1	<b>6</b>
27	Witterungsgeschützte Lagerung der PV-Module	4	0	3	1	1	<b>9</b>
28	Keine Vermischung der PV-Module mit Bauabfällen	4	1	3	0	2	<b>10</b>
29	PV-Module: Erfassung des Staubes am Entstehungspunkt	4	1	2	0	1	<b>8</b>
30-32	PV-Module: Getrennte Behandlung, Grenzwerte für Pb, Cd und Se, keine Vermischung / Verdünnung schadstoffhaltiger PV-Fraktionen	6	0	2	1	2	<b>11</b>
33	Vorrangige Verwertung von Glas aus PV-Modulen als Flach- oder Behälterglas	6	1	1	0	3	<b>11</b>
34	Rückgewinnung von Cd und Te aus PV-Modulen	4	1	3	0	0	<b>8</b>
35	Werkstoffliche Verwertung von Al aus PV-Modulbehandlung	4	1	3	0	2	<b>10</b>
36	2030: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von In und Ga aus PV-Modulen	4	1	1	0	3	<b>9</b>
37	2025: Anwendung von Verfahren zur Rückgewinnung von Ag und Si aus PV-Modulen	4	1	1	0	2	<b>8</b>
38	Quoten zur werkstofflichen Verwertung von Kunststoffen aus EAG je Kategorie	6	2	2	0	3	<b>13</b>
39	Separation von losen Glas- und Kunststoffinnenteilen aus Kühlger.	3	1	2	0	1	<b>7</b>
40	Separation von Holz aus Geräten > 25 cm Kantenlänge	3	1	1	0	2	<b>7</b>
41	Separation der Staubsaugerbeutel vor Zerkleinerung	2	0	1	0	1	<b>4</b>
42	Grenzwert max. xxxx ppm bromierten Flammschutzmittel in Kunststoffen	6	3	1	1	3	<b>14</b>
43	Separation von Kunststoffteilen mit durch POP-VO geregelten Flammschutzmitteln	6	0	2	0	3	<b>11</b>
44	Separation des Quecksilbers aus dental-medizinischen EAG	6	0	2	0	2	<b>10</b>

Behandlungsanforderung		Umweltrelevanz	Wirtschaftlichkeit	Umsetzbarkeit	Vergl. Anforderungen	Positive Auswirkungen	Gesamt
Nr.	Beschreibung						
45	Separation von zugänglichen Batterien nach § 14 vor Zerkleinerung	5	0	1	0	2	<b>8</b>
46	Zerstörungsfreie Separation von nicht zugänglichen Batterien	6	1	2	0	2	<b>11</b>
47	Grenzwert von 100 mg Cd / kg der nichtmetallischen Restfraktion	4	0	2	1	1	<b>8</b>
48	Separation von mindestens 1,8 kg Altbatterien pro Tonne des Inputs Kat. 5 + Kat. 6	5	0	2	1	2	<b>10</b>
49	Minimierung der Staubentwicklung bei Entladung und Behandlung von EAG mit Tonern, Fotoleitertrommeln	4	0	2	0	1	<b>7</b>
50	Separation von Tonerkartuschen, Farbtönern, Resttonerauffangbehältern	5	1	2	0	2	<b>10</b>
51	Zuführung von Tonerkartuschen u. Tintenpatronen zur VzW	4	1	3	0	0	<b>8</b>
52	Separation von Cadmium- oder Selen-haltigen Fotoleitertrommeln	6	0	1	1	0	<b>8</b>
53	Separation von Geräten mit Keramikfasern	6	0	0	1	1	<b>8</b>
54	Zerstörungsfreie Separation von PCB- und Elektrolytkondensatoren ohne Flüssigkeitsaustritt	5	0	2	0	1	<b>8</b>
55	Grenzwert 50 mg PCB / kg in der feinsten NMRF und Staubfraktion	6	0	2	1	2	<b>11</b>
56	Mindestmengen für die Separation von Kondensatoren aus EAG	5	0	2	1	2	<b>10</b>
57	Separation von BeO-haltigen Bauteilen aus gewerblichen Geräten	6	0	1	1	1	<b>9</b>