Rückgewinnung von Wertstoffen aus Elektrokleingeräten

P. Beigl · S. Salhofer

Angenommen: 21. Juni 2021 / Online publiziert: 12. Juli 2021
 © Der/die Autor(en) 2021

Zusammenfassung Das von der Europäischen Union 2017 beschlossene Kreislaufwirtschaftspaket sieht mehrere Strategien zur besseren Nutzung von Ressourcen vor. Neben der nachhaltigen Produktgestaltung und Maßnahmen zur Verringerung des Abfallaufkommens ist eine Intensivierung der Verwertung und die Schließung von Stoffkreisläufen ein wesentlicher Ansatz. Die Erhöhung der Recyclingziele wird insbesondere in ressourcenintensiven Branchen angestrebt, neben Kunststoffen, Textilien und dem Bauwesen spielt hier die Elektronikbranche eine wichtige Rolle. Bei der Verwertung von Elektroaltgeräten stellt die Sammelkategorie der Elektrokleingeräte eine besondere Herausforderung dar, diese Sammelkategorie ist heterogen, die einzelnen Gerätearten unterscheiden sich deutlich in ihrem Aufbau und ihrem Gehalt an Wertstoffen. Zusätzlich wird diese Gerätekategorie an Bedeutung gewinnen, da es einer der am schnellsten wachsenden Abfallströme in der EU ist. Die Verwertung besteht typischerweise aus Vorbehandlung (Demontage und Schadstoffentfrachtung, Zerkleinerung und Trennen von Materialströmen), Rückgewinnung von Sekundärressourcen in Form von Materialien (Eisen und Stahl, Nichteisenmetalle wie Aluminium und Kupfer) und Energie sowie der Entsorgung nicht verwertbarer Materialien. Die Optimierung von Verfahren zur Aufbereitung erfordert umfassende Datengrundlagen zur Charakterisierung dieses heterogenen Abfallstroms. Der Beitrag stellt eine Methode vor, wie die Materialzusammensetzung von Elektrokleingeräten nach Gerätegruppen genauer abgebildet werden kann und wie diese Daten zur Optimierung

der Vorbehandlung genutzt werden können.

Schlüsselwörter Elektrokleingeräte · Elektroaltgeräte · Recycling · Charakterisierung · Materialzusammensetzung · Verfahrensoptimierung

Recovery of resources from small electrical and electronic equipment

Abstract The circular economy package adopted by the European Union in 2017 provides for several strategies to make better use of resources. In addition to sustainable product design, measures to reduce waste generation, an intensification of recycling and the closing of material cycles are essential approaches. The increase in recycling targets is particularly targeted in resource-intensive sectors; in addition to plastics, textiles and the construction industry, the electronics sector plays an important role here. In the recycling of WEEE, the collection category of small electrical appliances poses a particular challenge; this collection category is heterogeneous, the individual types of appliances differ significantly in their structure and their content of recyclable materials. In addition, this category will gain importance as it is one of the fastest growing waste streams in the EU. Recovery typically consists of pre-treatment (dismantling and de-pollution, shredding and separation of material streams), recovery of secondary resources in the form of materials (iron and steel, non-ferrous metals such as aluminium and copper) and energy, and disposal of non-recyclable materials. The optimisation of processes for reprocessing requires more comprehensive data bases for the characterisation of this heterogeneous waste stream. The paper presents a method for mapping the material composition of small electrical appliances more precisely by appliance group and how these data can be used to optimise pre-treatment.

Keywords Waste electrical and electronic equipment (WEEE) · Small waste electrical and electronic equipment · Recycling · Characterisation · Material composition · Process optimisation

1 Einleitung

Das von der Europäischen Union 2017 beschlossene Kreislaufwirtschaftspaket sieht mehrere Strategien zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen vor. Neben der nachhaltigen Produktgestaltung und Maßnahmen zur Verringerung des Abfallaufkommens, beispielsweise durch Förderung der Reparatur, ist eine Intensivierung der Verwertung und die Schließung von Stoffkreisläufen durch Verwertung von Abfällen ein wesentlicher Ansatz. Die Erhöhung der Recyclingziele wird insbesondere in ressourcenintensiven Branchen angestrebt, neben den Bereichen Kunststoffe, Textilien und dem Bauwesen spielt hier die Elektronikbranche eine wichtige Rolle. Bei der Verwertung von Elektroaltgeräten stellt die Sammelkategorie der Elektrokleingeräte eine besondere Herausforderung dar, diese Sammelkategorie ist heterogen, die einzelnen Gerätearten unterscheiden sich deutlich in ihrem Aufbau und ihrem Gehalt an Wertstoffen. Zusätzlich wird diese Gerätekategorie Bedeutung gewinnen, da sie einer der am schnellsten wachsenden Abfallströme in der EU ist. Die Verwertung besteht typischerweise aus Vorbehandlung (Demontage und Schadstoffentfrachtung, Zerkleinerung und Trennen von Materialströmen), Rückgewinnung von Sekundärressourcen in Form von Materialien (Eisen und Stahl, Nichteisenmetalle wie Aluminium und Kupfer) und Energie sowie der Entsorgung nicht verwertbarer Materialien. Die Verbesserung von Verfahren zur Aufbereitung und Verwertung von Elektroaltgeräten (EAG) erfordert umfassende Methoden und Datengrundlagen zur Charakterisierung dieses heterogenen Abfallstroms. Der derzeitige Schwerpunkt der Beprobung von EAG basiert zumeist auf analytischen Ver-

DI Mag. P. Beigl (✉) ·
 ao. Univ.-Prof. DI Dr. S. Salhofer
 Department für
 Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut
 für Abfallwirtschaft (ABF-BOKU),
 Universität für Bodenkultur Wien,
 Muthgasse 107, 1190 Wien, Österreich
peter.beigl@boku.ac.at

fahren von wertstoffreichen Bauteilen wie z. B. Leiterplatten. Die Zusammensetzung des Abfallstroms basierend auf den typischen Eigenschaften von Produktgruppen wurde bisher kaum untersucht.

Die stark unterschiedliche Charakteristik von Elektroaltgeräten nach Sammelkategorien ist eine große Herausforderung für die Optimierung von Aufbereitungs- und Verwertungsprozesse. Bezogen auf die Gesamtmasse sind Elektrogroßgeräte wie z. B. Waschmaschinen sehr relevant, während kleine IT-Geräte wie Personal Computer, Multifunktionsdrucker, Mobiltelefone und Receiver eine untergeordnete Rolle spielen. Im Gegensatz dazu zeigt der Fokus auf Leiterplatten und andere wertvolle Bauteile, dass der Beitrag von kleinen IT- und Telekomgeräten diesbezüglich deutlich höher als der von Elektrogroßgeräten ist. Eine Herausforderung besteht also darin, spezifische Aufbereitungsverfahren für unterschiedliche Sammelkategorien effizient umzusetzen. Weiters sollten die Unterschiede zwischen Gerätearten innerhalb einer Sammelkategorie nicht unterschätzt werden. Während der Massenanteil an Wertmetallen bei manchen Gerätearten niedrig und mangels Technologiesprüngen recht gleichmäßig ist, können Wertmetallanteile im Fall von Produkten mit kurzen Innovationszyklen und relativ kurzer Nutzungsdauer sehr stark variieren, z. B. bei kleinen, tragbaren, elektronischen Geräten.

Bisher beschränkten sich die Methoden zur Charakterisierung von EAG in Europa meist auf die Beprobung der Outputströme bei Vorbehandlungsanlagen. Da EAG-Sammelungen anfangs betreffend Herkunft und Gerätearten undifferenziert verarbeitet wurden, bestand nur Erfahrungswissen über die Mischung dieser Sammelware. Im Zuge der Einführung der EAG-Richtlinie (EG 2002) sowie der Altfahrzeug-Richtlinie (EG 2000) wurden Batchversuche mit standardisierten Sammelkategorien eingeführt, um belastbare Erkenntnisse zu Recyclingquoten und zur Prozessoptimierung zu gewinnen. Die Inputströme der jeweiligen Batchversuche bezogen sich auf relativ breite Sammelkategorien (z. B. Altfahrzeuge, Elektrogroßgeräte, Elektrokleingeräte). Aktuelle Forschungsprojekte legen den Fokus auf kleinmaßstäbliche Batchversuche mit 2 bis 5 t Input mit definierten Gerätearten, z. B. kabelgebundene Telefone beim RePro-Projekt (Sander et al.

Abb. 1 Vorgehensweise für die input- und outputbasierte Charakterisierung der Materialflüsse

2014). Der aktuelle Trend geht in Richtung der weiteren Differenzierung nach Gerätearten, um die Rückgewinnungsquoten wertvoller Technologiemetalle in Kombination mit intensivierten Demontageschritten zu optimieren.

Ziel dieses Beitrags ist es, eine Vorgehensweise für eine genauere Charakterisierung von Elektrokleingeräten (EKG) zu beschreiben. Dabei werden innerhalb der EKG Gerätegruppen unterschieden, die unterschiedliche Materialzusammensetzung aufweisen. Diese Differenzierung ist eine Voraussetzung für eine Optimierung der Aufbereitungsverfahren mit dem Ziel, höhere Recyclingquoten, aber auch die gezielte Rückgewinnung bestimmter Wertstoffe (z. B. Edelmetalle, Kupfer) zu erreichen. Neben der Methode werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

2 Material und Methoden

Die hier vorgestellte Methodik zur Bestimmung der Materialzusammensetzung von Elektrokleingeräten baut darauf auf, dass sowohl inputseitig als auch für den Output von Aufbereitungsprozessen Daten vorliegen bzw. gewonnen werden können. Die Daten zur Zusammensetzung des Inputmaterials der Vorbehandlung wurden im Wesentlichen aus Demontageversuchen in Kombination mit Gerätezahlungen gewonnen. Die Outputflüsse wurden bei

einer Aufbereitungsanlage für EAG in Österreich untersucht. Die Aufbereitung selbst wird dabei als Black Box betrachtet. Im Rahmen von mehreren Batchversuchen mit unterschiedlichem Material wurden Input und Output mit einem stochastischen Modell abgeglichen. Es wurden 4 Batchversuche mit Sammelware aus dem Haushaltsbereich und 2 Versuche mit Elektrokleingeräten aus dem IT-Bereich durchgeführt. Pro Batchversuch wurden ca. 100 t Input an Elektrokleingeräten verarbeitet.

Abb. 1 zeigt die Vorgehensweise: Die Materialzusammensetzung nach Gerätearten wurde durch Demontageversuche bestimmt. Die Zusammensetzung der Inputmasse baut neben der Gerätezusammensetzung auf eine Bestimmung der Anteile der Gerätearten im Input (Gerätezahlungen) auf. Auf der Outputseite werden die Materialströme verwogen und mittels Klaubung in ihrer Zusammensetzung untersucht. Diese Vorgehensweise wurde für Batchversuche mit unterschiedlicher Sammelware angewandt.

2.1 Charakterisierung Input

Den Ausgangspunkt für die Charakterisierung der Materialzusammensetzung von Elektrokleingeräten bildeten Demontageversuche sowie Gerätezahlungen aus Vorprojekten, die vom Institut für Abfallwirtschaft (BOKU) in Koope-

ration mit Projektpartnern, insbesondere dem Demontage- und Recycling-Zentrum (DRZ), durchgeführt wurden (Grassl 2013; Meskers et al. 2009; Salhofer 2013). Da Gerätearten und Bauteile unterschiedlich klassifiziert werden, wurde eine Standardisierung und Konsolidierung der vorhandenen Daten vorgenommen.

In den letzten Jahren wurden auf nationaler und internationaler Ebene zahlreiche Klassifikationen für Elektroaltgeräte eingeführt und weiterentwickelt. Die Kataloge variieren sehr stark bezüglich der Ausrichtung auf gesetzliche Anforderungen (z. B. EAG-VO (BMLFUW 2014) oder ROHS-RL (EU 2011)), sammel- und verwertungsorientierte Aspekte sowie auch Herkunft. Daraus ergibt sich auch eine stark unterschiedliche Definition und somit Umfang der verwendeten Kategorien, die von z. B. sechs Sammelkategorien laut EAG-Richtlinie (EU 2012) über die erweiterten 17 Sammelkategorien laut WEEE Forum/UNU (Huisman 2014) bis zu 1062 Gerätearten laut Geräteliste des BMLFUW reichen kann (BMK 2020). Mit Blickrichtung auf die EAG-Verwertung wurde hier ein Katalog mit 216 Gerätearten verwendet, der auf den etablierten UNU Keys (Baldé et al. 2015) mit derzeit 54 Gerätegruppen aufbaut. In der entwickelten Geräteklassifikation wurden Gerätearten innerhalb der UNU Keys differenziert, die bezüglich Stückmasse und Zusammensetzung nach Materialien homogen sind. Als Beispiel für die verwendete Einteilung sind die Gerätetypen innerhalb der kleinen IT- und Telekom-Geräte lt EAG-RL 2012/19/EU in Tab. 1 aufgelistet.

In Hinblick auf eine verbesserte Abschätzung des Wertmetallgehalts in Elektrokleingeräten war es erforderlich, die zu diesem Zeitpunkt bestehenden

Demontagedaten zu erweitern. Auf Basis einer Literatursauswertung wurden dazu Gerätegruppen mit wertstoffreichen Bauteilfraktionen identifiziert. Zur Ergänzung der bereits vorhandenen Datensätze wurde auf Basis des Leiterplattenanteils an der gesamten Gerätemasse, des Anteils am gesamten Gerätewarenkorb (auf Basis von mehreren Gerätezahlungen) und der bisher zerlegten Geräteanzahl eine Auswahl der Gerätegruppen für die Demontagen getroffen. Grundlage für den Gerätewarenkorb waren Gerätezahlungen der Sammelware von mehreren österreichischen Abfallwirtschaftsverbänden, wobei der erläuterte Katalog mit 216 Gerätearten verwendet wurde. Die Gewichtung berücksichtigte den Wertmetallgehalt auf Grundlage von Literaturdaten, wobei wie zu erwarten wertmetallreiche Geräte stärker repräsentiert waren.

In der Folge wurden jeweils 20 Geräte folgender Gerätearten demontiert: Audiogerät (klein) (z. B. MP3-Player, Walkman), Computerspielkonsole (z. B. Playstation), Diskman, Joystick, Laptop/Notebook (mit Akku), Lautsprecher (groß, mittel sowie klein), Maus, Mobiltelefon (mit Akku), Multifunktionsdrucker, PC, PC (Server), Receiver und Uhren.

Die Gerätedemontage inklusive Bauteilidentifikation erfolgte mithilfe verschiedener Schraubenzieher, Zangen, Seitenschneider, Hämmer und Magneten. Zusätzlich zur Verwiegung der Bauteile wurde, wenn möglich, eine Altersbestimmung der Geräte durchgeführt. Zuerst wurden, soweit vorhanden, alle Gehäuseschrauben gelöst, um das Gehäuse abzulösen. Im Inneren des Geräts befindliche Schrauben wurden ebenfalls gelöst, soweit dies zur Auftrennung in verschiedene Bauteile

vonnöten war. Alle Kabel wurden von anderen Bauteilen getrennt.

Die Demontagetiefe wurde durch den Bauteilkatalog bestimmt: Die Zuteilung erfolgt zur detailliertesten möglichen Ebene des Bauteilkatalogs. Wenn mit den zur Zerlegung verwendeten Werkzeugen eine weitere Fraktionierung nicht möglich war bzw. eine eindeutige Zuteilung zu einer eigenen Materialkategorie (z. B. PCBs) nicht möglich war, wurde das Bauteil als „komplexes Bauteil“ klassifiziert, z. B. Motoren (Cu-Fe-Verbund), Festplatte etc. Die gewonnenen Daten aus den Versuchszersetzungen werden in einer Datenbank verwaltet, die derzeit über 1100 Elektroaltgeräte aus 89 Gerätearten umfasst. Der Schwerpunkt liegt hierbei bei Elektrokleingeräten und Bildschirmgeräten (z. B. Laptops, FDP-Monitore). Die Masse der bisher demontierten ca. 18.500 Bauteile beträgt 3700 kg.

Parallel zu den Demontageaktivitäten durchgeführte Gerätezahlungen dienen dem Zweck, die Verteilung der EAG-Sammelmengen nach Gerätearten zu erheben, um die Zusammensetzung von sogenannten EAG-Warenkörben nach Gerätearten sowie – statistisch abgeschätzt – nach Materialgruppen zu ermöglichen. Dabei werden Anzahl, Stückmasse, Zustand und je nach Fragestellung weitere Charakteristika nach Geräteart erhoben. Die vom Institut für Abfallwirtschaft durchgeführten Gerätezahlungen zu unterschiedlichen Studien umfassen derzeit ca. 18.000 Geräte mit ca. 38 t Gesamtmasse.

Für die Abschätzung von Materialanteilen innerhalb von Warenkörben ist die Verschneidung von Demontage- und Zählungsdaten wesentlich. Damit kann der Wertstoffgehalt von Inputströmen ermittelt und mit den

Tab. 1 Verwendete Geräteklassifikation: Beispiel Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte laut EAG-Richtlinie (EU 2012)

UNU Key (Baldé et al. 2015)	Gerätearten laut eigener Klassifikation
0301 Small IT & accessories	Registrierkasse klein; Schreibmaschine; Taschenrechner; Festplatte (PC-Bauteil); Festplatte (extern); Laufwerk (optisch); Laufwerk (sonstige); Leiterplatte (Motherboard); Leiterplatte (RAM); Leiterplatte, sonstige IT-; Lüfter (CPU); Maus; Router, Modem (klein); Netzteil (klein); Netzteil (mittel); Netzteil, PC-; Tastatur; Webcam; Freisprecheinrichtung; USV-Anlage
0302 Desktop PCs	PC (komplett); PC (ohne Festplatte); PC (Server); PC (wertstoffberaubt)
0304 Printers	Drucker, Laser-; Drucker, Multifunktions-; Drucker, Nadel-; Drucker, Tintenstrahl-; Druckerpatrone; Faxgerät; Scanner
0305 Telecom	Anrufbeantworter; Funkgerät/Babyphon/Schnurlostelefon; Gebührenzähler; Telefon, kabelgebunden; Telefon, Schnurlos- (Station)
0306 Mobile phones	Telefon, Mobil- (mit Akku); Telefon, Mobil- (ohne Akku)
0307 Professional IT	Router (groß)
Anm: bei PCs wurden unterschieden: PC (komplett), PC Server, beides vollständige Geräte; PC (ohne Festplatte) und PC (wertstoffberaubt), bei letzteren sind neben der Festplatte auch andere Bauteile entfernt worden.	

Outputströmen abgeglichen werden. Aus funktioneller Sicht ermöglicht die erstellte Datenbank diesen Abgleich unter Verwendung beliebiger Geräte- und Materialklassifikationen.

2.2 Aufbereitung von Elektrokleingeräten

Die Vorbehandlung in der untersuchten Behandlungsanlage besteht aus sieben Hauptbearbeitungsschritten, die mit A bis G gekennzeichnet sind (Abb. 2). Der Smasher (A) ist eine große rotierende Trommel, in deren Innerem die Geräte aufgebrochen werden. Anschließend werden freigesetzte Leiterplatten (PCBs), Batterien und Kondensatoren und andere schadstoffhaltige Bauteile manuell aussortiert. Das verbleibende Material wird mit einem Shredder zerkleinert (B), dabei entstehen drei Ausgangsströme, die Shredder-Grobfraktion, eine Shredder-Feinfraktion und eine eisenhaltige Ausgangsfraktion, die die Vorbehandlung verlässt. Die Shredder-Feinfraktion wird gesiebt (C) und die resultierende Feinfraktion wird einer Trockenaufbereitung zugeführt (D), wobei hauptsächlich Shredder-Feinfraktion anfällt. Die Grobfraktion aus der Siebung (C) wird in einem Schwimm-Sink-Verfahren nass aufbereitet (F), wobei hauptsächlich Kunststoffteile als Ausgangsfraktionen anfallen. Die Shredder-Grobfraktion, die stückige und flache Teile enthält, wird ebenfalls gesiebt (E) und eisenhaltigeres Material sowie Kupfer werden ausgeschleust. Der Großteil des verbleibenden Materials wird in der Nassaufbereitung (G) weiterbehandelt, der massenrelevante Output ist Material für das Kunststoffrecycling. Eine kleine Menge des Outputs aus Prozess E wird in einem Trockenaufbereitungsschritt zusammen mit Material aus Prozess C weiterbehandelt. Es gibt eine Reihe zusätzlicher Prozessschritte, die als Teil der Vorbehandlung stattfinden, um die Qualität der einzelnen Ströme zu verbessern. Eine detailliertere Technologiebeschreibung ist in Höggerl (2015) zu finden; ein vereinfachter Prozess und die Massenströme sind in Abb. 2 dargestellt.

Von der 1 t WEEE-Input werden in der untersuchten Vorbehandlungsanlage 804,9 kg zur stofflichen Verwertung weitergegeben. Davon sind 410,4 kg für das Eisenmetallrecycling bestimmt, 213,5 kg werden im Kunststoffrecycling behandelt, 135,3 kg gehen ins Kupferre-

Abb. 2 Schematische Prozesse und Massenströme bei der Vorbehandlung von Elektrokleingeräten in der untersuchten Vorbehandlung

cycling und 42,9 kg ins Aluminiumrecycling. Die verbleibenden 2,9 kg stellen Batterien dar, die in einer Batterierecyclinganlage weiterverarbeitet werden. Insgesamt werden 192,7 kg in einer regionalen Müllverbrennungsanlage thermisch behandelt und 2,4 kg auf eine Deponie geleitet. Bei dem letztgenannten Anteil handelt es sich um inertes Material wie Glas, Beton oder Keramik.

2.3 Charakterisierung der Outputströme

Die outputseitige Materialcharakterisierung umfasst mehr als 50 einzelne Ausgangsströme der Vorbehandlungsanlage. Jeder dieser Materialströme wurde mittels Handklaubung in bis zu 24 Fraktionen getrennt, um die tatsächliche Materialzusammensetzung zu bestimmen. Dabei wurde der Anteil an recyclingrelevantem Material in jedem Outputstrom ermittelt. Recyclingrelevant bedeutet, dass dieses Material einer bestehenden Recyclingroute zugeordnet werden kann, in der dieses Material zurückgewonnen wird. Zur Ermittlung der Zusammensetzung von Leiterplatten wurden verschiedene Informationsquellen herangezogen. Leiterplatten werden während der Vorbehandlung in mehreren Stufen getrennt. Für diese Studie wurde davon ausgegangen, dass Leiterplatten die gleiche Zusammensetzung haben, und zwar unabhängig davon, in welcher Stufe des Prozesses sie aussortiert wurden. Diese Annahme basiert auf Untersuchungen, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden und die zeigen, dass der Metallgehalt der Leiterplatten (und insbesondere des Edelmetalls)

relativ unabhängig davon ist, wie viel Verarbeitung stattgefunden hat. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch den mechanischen Abrieb einiger montierter Einheiten während der Verarbeitung ein Konzentrationseffekt eintritt (da weniger nicht wertvolles Material in 1 kg Leiterplatten enthalten ist), während es gleichzeitig auch Verluste an Edelmetallen durch Abrieb während der Verarbeitung gibt. Dies steht im Gegensatz zu Untersuchungen von Chancerel und Rotter (2009), die vermuten, dass eine stärkere Zerkleinerung der Leiterplatten, die aus einer steigenden Anzahl von Verarbeitungsschritten resultiert, die Konzentration von Edelmetallen in der resultierenden PCB-Fraktion zu senken scheint. Chancerel und Rotter (2009) weisen jedoch darauf hin, dass dies daran liegen könnte, dass vor dem Shreddern mehr edelmetallhaltige PCBs entnommen werden und somit Material, das geshreddert wird, von vornherein einen geringeren Edelmetallgehalt aufweist. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch beim Kupfergehalt. Die nach der Zerkleinerung entnommenen Leiterplatten hatten typischerweise einen Kupfergehalt von 17 %, während die in einer späteren Verarbeitungsstufe entnommenen Leiterplatten einen Kupfergehalt von bis zu 30 % aufweisen. Dies dürfte auf den Massenverlust von Bauteilen, die auf der Leiterplatte montiert sind und keinen hohen Kupferanteil aufweisen, zurückzuführen sein. Durch die Zusammenführung dieser Informationen wurde eine typische Zusammensetzung pro kg PCB aus den Eingangs-Elektroaltgeräten abgeleitet und auf die PCB-Ausgangsströme angewendet.

Abb. 3 Erhobene und prognostizierte Massenanteile im Output für Eisen/Stahl, Kunststoffe und Leiterplatten bezogen auf den jeweiligen Output der EKG-Aufbereitung aus Haushalten

Abb. 4 Gehalt an Leiterplatten nach Gerätearten

3 Ergebnisse zur Zusammensetzung und Rückgewinnung

3.1 Modellbasierte Schätzung der Zusammensetzung

Für einzelne Materialströme wie Eisen und Stahl, Kunststoffe sowie Leiterplatten wurde mithilfe eines stochastischen Modells die modellbasierte Prognose

des Outputs mit der tatsächlichen, vor Ort erhobenen Outputzusammensetzung validiert. Das erlaubt die Abschätzung des Anlagenoutputs auf Basis der Zusammensetzung der Sammelware (d.h. Mix nach Gerätearten) sowie der Gerätezusammensetzung. Beispielsweise wurde bei Sammelware aus dem IT-Bereich ein Leiterplattengehalt von 5,7% prognostiziert und 5,2% im Output wiedergefunden. Bei EKG

aus Haushalten wurde ein Leiterplattenanteil von 2,9% prognostiziert bzw. 2,5% erhoben. Bei Eisen/Stahl sowie Kunststoffen wurden ebenfalls Ergebnisse mit zufriedenstellender Genauigkeit erzielt. Abb. 3 zeigt die Relationen von erhobenen und prognostizierten Materialanteilen des Anlagenoutputs, jeweils bezogen auf den tatsächlichen Materialanteil in EKG aus Haushalten (Index=100). Dieser Abgleich ist allerdings noch nicht für alle Fraktionen möglich, insbesondere Materialien, die überwiegend im Verbund in komplexen Bauteilen eingesetzt sind (wie Al/Mg), erfordern noch detailliertere Untersuchungen.

3.2 Materialanteile nach Gerätekategorien

Mithilfe der Demontagedatenbank können Gerätearten identifiziert werden, die höhere Anteile an relevanten Materialien aufweisen. Beispielsweise zeigt Abb. 4 die Anteile an Leiterplatten nach Gerätekategorien. Dabei wird der Anteil an LP in jeder Gerätekategorie gezeigt – für Leiterplatten zwischen 2 und 17 Gew.-%. In Verbindung mit den Warenkörben, die die Zusammensetzung der Sammelware nach Gerätekategorien widerspiegelt, kann damit auch der Beitrag jeder Gerätekategorie zu der in der Sammelware enthaltenen Wertstofffraktion (hier Leiterplatten) abgeschätzt werden.

4 Schlussfolgerungen

Um die ambitionierten Ziele des Europäischen Kreislaufwirtschaftspakets umzusetzen, sind für den Umgang mit Elektroaltgeräten umfassende Maßnahmen notwendig. Sie erfordern auch eine Intensivierung der Sammlung von Elektroaltgeräten, beispielsweise durch eine intensivere Rücknahme durch den Handel, die Unterbindung illegaler Exporte, den verstärkten Einsatz von Anreizsystemen und die Förderung freiwilliger Initiativen (s. auch Unger et al. 2017).

Um Verluste in der Verwertung zu reduzieren und höhere Verwertungsquoten zu erreichen, sind mehrere Ansätze notwendig. Sie umfassen eine Verbesserung der Rückgewinnung, vor allem von Kunststoffen im Recycling, eine engere Kooperation und besseren Informationsaustausch entlang der Wertschöpfungskette, z. B. zwischen Produzenten, Aufbereitern und Verwertern, die Optimierung der Aufbereitungsprozesse

durch Berücksichtigung der Charakteristik der Sammelware und die Schaffung von Anreizen zur Rückgewinnung speziell von kritischen Rohstoffen, um künftigen Versorgungsengpässen entgegenzuwirken.

Der vorliegende Beitrag zeigt auf, wie die Materialzusammensetzung von Elektrokleingeräten detaillierter ermittelt werden kann. Das angewandte Modell zeigt eine gute Übereinstimmung für Materialströme wie Eisen und Stahl, Kunststoffe oder Leiterplatten. Bei Materialverbunden ist es schwieriger, die Materialzusammensetzung zu bestimmen, hier sind weitere Analysen erforderlich. Mithilfe der gewonnenen Informationen und der Demontage-datenbank können Geräte mit einer Zielfraktion identifiziert und die Aufbereitungsprozesse optimiert werden.

Danksagung Das zugrunde liegende Projekt („Rohstoffe aus EAG“) wurde von Dr. Stefan Luidold (Montanuniversität Leoben) geleitet und von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG Projekt Nummer 843620) unterstützt. Besonderer Dank geht an die Müller-Guttenbrunn-Gruppe und DI Günther Höggerl für die konstruktive Zusammenarbeit.

Funding Open access funding provided by University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle

ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J. (2015): The global e-waste monitor—2014, United Nations University, IAS—SCYCLE, Bonn, Germany.

BMLFUW (2014): Elektroaltgeräteverordnung idF 2014 (EAG-VO).

BMK (2020): Geltungsbereich der Elektroaltgeräteverordnung – aktuelle Listen 2020. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/elektroaltgeraete/recht/eag-vo_geltungsbereich.html

Chancerel, P., Rotter, S. (2009): Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 29, 2336–2352.

EG (2000): Richtlinie 2000/53/EG vom 18.09.2000 über Altfahrzeuge (ELV-RL).

EG (2002): Richtlinie 2002/96/EG vom 27.01.2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG-RL I).

EU (2011): Richtlinie 2011/65/EU vom 08.06.2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (ROHS-RL).

EU (2012): Richtlinie 2012/19/EU vom 04.07.2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG-RL II).

Grassl, P. (2013): Sammelversuch zur Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 2013

Högerl, G. (2015): Aufbereitung von Elektroaltgeräten nach dem neuesten Stand der Technik. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 160, 275–283.

Huisman, H. (2014): Countering WEEE Illegal Trade (CWIT)—Database and WEEE Classification Listing. Accessed at 27 July 2016 at http://www.cwitproject.eu/wp-content/uploads/2013/11/CWIT_D2-3_Database-and-WEEE-classification-listing.pdf

Meskers, C.E.M., Hagelüken, C., Salhofer, S., Spitzbart, M. (2009): Impact of pre-processing Routes on Precious Metal Recovery from PCs. *Proceeding of EMC 2009*, pp 527–540

Salhofer, S. (2013): Management of small high grade WEEE. Presentation at the ISWA Beacon Conference “Optimising Collection and Recy-

cling of WEEE” Düsseldorf 13./14. November 2013.

Sander, K., Hartfeil, T., Hobohm, S., Wasserberg, S., Kuchta, K. (2014): Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektround Elektronikgeräten; UFO Plan-Vorh. FKZ 3711 95 318; Workshop zum Arbeitspaket 3 am 27.02.2014.

Unger, N., Beigl, P., Salhofer, S. (2017): Elektrokleingeräte – Von der Sammlung zur Sekundärressource. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 69, 428–436.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.