

Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Sammelversuch zur Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht von

Patrick Grassl, Bakk. techn.

Studienkennz.: 427 / Matr. Nr.: 0740673

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Salhofer

Wien, im August 2013

A. Kurzfassung

Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG) fallen heutzutage in einer enormen Typenvielfalt und Materialzusammensetzung an. Durch die rasche technologische Entwicklung, immer kürzer werdenden Innovationszyklen und sinkenden Produktlebensdauern steigen die EAG-Mengen zudem weltweit kontinuierlich an. Kaum eine andere Abfallfraktion enthält so viele wertvolle Stoffe wie EAG. Diese Geräte bestehen aus Kunststoffen, Kupfer, Aluminium, beinhalten aber auch Edelmetalle wie Gold, Palladium und Silber. Für die Rückgewinnung dieser wertvollen Stoffe benötigen EAG eine gezielte Behandlung. Durch eine getrennte Erfassung der wertstoffreichen Elektrokleingeräte (EKG) wie Mobiltelefone, Laptops oder Computer kann dies noch unterstützt werden. Auch die im August 2012 in Kraft gesetzte Neufassung der europäischen Elektroaltgeräte-Richtlinie sieht eine eigene Sammelkategorie für die wertstoffreichen Geräte der Informations- und Kommunikationstechnologie vor.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Umsetzbarkeit einer getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf Recyclinghöfen in Österreich zu testen. Dazu wurde 2012 ein wissenschaftlicher Sammelversuch auf fünf Recyclinghöfen im österreichischen Bundesland Tirol durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Praxistests zeigen, dass eine getrennte Erfassung wertstoffreicher EKG auf den Recyclinghöfen mit vertretbarem Arbeitsaufwand und Platzbedarf möglich ist. Im Sammelversuch konnten etwa 0,6 kg/EW.a an wertstoffreichen EKG pro Recyclinghof getrennt gesammelt werden. Eine Analyse hinsichtlich der wertvollen Inhaltsstoffe von EKG verdeutlicht, dass schon durch die Sammlung einer geringen Menge bestimmter wertstoffreicher Kleingeräte ein großes Wertstoffpotential erfasst wird.

B. Abstract

Today, waste electrical and electronic equipment (WEEE) accumulates in a huge variety of types and material compositions. Due to the rapid technological development, shorter product cycles and decreasing product lifetimes, the amounts of WEEE worldwide continuously increase. Hardly any other waste fraction contains so many valuable substances such as the WEEE. These devices are made of plastic, copper, aluminum, but also contain precious metals such as gold, palladium and silver. For the recovery of these valuable substances, WEEE require targeted treatment. This can be supported by a separate collection of high-grade small electrical and electronic equipment (sWEEE) such as mobile phones, laptops or computers. Also the recast of the WEEE directive, which came into force August 2012, provides for its own collective category for high-grade units of information and communication technology.

The goal of this thesis is to test the feasibility of a separate collection of high-grade sWEEE at recycling centres in Austria. For this purpose a scientific collection experiment was conducted in 2012 at five different recycling centres in the Austrian federal state of Tyrol. The results of the field tests show that a separate collection of recyclable high-grade sWEEE is possible and is in conjunction with reasonable effort and space requirements. In the single experiment about 0.6 kg/cap/yr of high-grade sWEEE could be collected separately per recycling centre. An analysis in terms of the valuable ingredients of sWEEE shows that a large recycling potential is already recognized by collecting only a small amount of certain high-grade small appliances.

C. Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all jenen bedanken, die es mir ermöglicht haben, diese Arbeit fertigzustellen.

Insbesondere gilt dies für meinen Betreuer Prof. Dr. Stefan Salhofer für seine fachkundige Unterstützung, die hilfreichen Ratschläge und konstruktive Kritik.

Ein großer Dank für die professionelle Unterstützung gebührt weiters den MitarbeiterInnen der teilnehmenden Recyclinghöfe und des Abfallverbands Tirol Mitte, die durch ihr großes Engagement das erfolgreiche Gelingen des Sammelversuchs ermöglichten: Ing. Alexander Würtenberger, Peter Jeram, Thomas Leis, Eva Lovric-Sporer und Manfred Zöttl.

Neben all diesen Personen geht ein herzliches Dankeschön an meine Eltern Alfred und Susanna, die mir meine akademische Ausbildung ermöglicht haben. Ebenso danke ich meiner Freundin Viktoria für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Gerätesortierung und, dass sie stets ein offenes Ohr für mich hatte.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung der Masterarbeit.....	1
1.2	Aufbau der Masterarbeit	2
2.	Gesetze und rechtliche Rahmenbedingungen	4
2.1	Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte	4
2.2	Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.....	5
2.3	Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung	6
2.4	Elektroaltgeräteverordnung.....	6
2.5	Abfallbehandlungspflichtenverordnung.....	7
3.	Recyclingrelevante Eigenschaften von Elektrokleingeräten.....	8
3.1	Definitionen und Gerätekategorisierung.....	8
3.2	Materialzusammensetzung von EKG.....	10
3.3	Bedeutung von Edelmetallen in EKG.....	13
4.	Sammlung und Behandlung von EKG	20
4.1	Sammlung von EKG	21
4.1.1	Praktizierte Sammelsysteme	23
4.1.2	Sammelverluste	25
4.2	Aufbereitung.....	27
4.3	Rückgewinnung von Edelmetallen	32
4.3.1	Pyrometallurgische Rückgewinnung.....	33
4.3.2	Hydrometallurgische Rückgewinnung	34
4.3.3	Biometallurgische Rückgewinnung.....	34
4.3.4	Vorteile der Edelmetallrückgewinnung aus EKG	35
4.3.5	Informelle Behandlung	36
5.	Sammelversuch zur Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte	39
5.1	Ziel des Sammelversuchs	39
5.2	Versuchsaufbau und Ergebnisse	39
5.2.1	Vorstellung der teilnehmenden Recyclinghöfe.....	39
5.2.2	Erstellung der Liste wertstoffreicher Elektrokleingeräte	41
5.2.3	Sortieranalyse vor dem Sammelversuch	42
5.2.4	Einrichtung und Umsetzung des Sammelversuchs	44
5.2.5	Sortieranalyse im Sammelversuch	48
5.2.6	Mengenauswertung	50
5.2.7	Auswertung hinsichtlich wertvoller Inhaltsstoffe	51
6.	Schlussfolgerungen.....	56

Literaturverzeichnis	59
Abbildungsverzeichnis.....	66
Tabellenverzeichnis.....	68
Anhang.....	70

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
Ag	Silber (chemisches Element)
ATM	Abfallverband Tirol Mitte
Au	Gold (chemisches Element)
AWZ	Abfallwirtschaftszentrum
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
CO ₂	Kohlendioxid
CRT	Cathode Ray Tube
EAG	Elektro- und Elektronik-Altgerät(e)
EAK	Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle
EEG	Elektro- und Elektronikgerät(e)
EG	Europäische Gemeinschaft
EKG	Elektrokleingerät(e)
EU	Europäische Union
EW	EinwohnerIn(nen)
FORUM	Fortschritt im Regionalen Umweltschutz
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
PBB	Polybromiertes Biphenyl
PBDE	Polybromierter Diphenylether
PC	Personal Computer
PCB	Polychloriertes Biphenyl
Pd	Palladium (chemisches Element)
PP	Polypropylen
PROSA	Problemstoffsammlung
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RH	Recyclinghof
RL	Richtlinie
RoHS	Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances
VO	Verordnung
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

1. Einleitung

Die zunehmende Bedeutung von Recycling aufgrund der Verknappung und Verteuerung von Primärrohstoffen sowie aktuelle Debatten über nachhaltige Entwicklungspfade haben auch die Diskussionen über die Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (EAG) verstärkt. Man hat mittlerweile erkannt, dass diese Abfälle wertvolle Sekundärrohstoffe darstellen. EAG fallen in einer enormen Typenvielfalt und Materialzusammensetzung an. Durch die rasche technologische Entwicklung, immer kürzer werdende Innovationszyklen und sinkende Produktlebensdauern steigen die EAG-Mengen weltweit kontinuierlich an. UNEP (2005) berichtet, dass jährlich weltweit 20 bis 50 Millionen Tonnen an EAG anfallen. Huisman et al. (2007) schätzen, dass allein in den 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) 2005 zwischen 8,3 und 9,1 Millionen Tonnen an EAG anfielen. EAG sind eine der am schnellsten wachsenden Abfallströme. Mit jährlichen Zuwachsraten von bis zu 3 % werden für 2020 über 12 Millionen Tonnen an EAG in der EU-27 erwartet.

EAG bestehen einerseits aus gesundheits- und umweltrelevanten Schadstoffen, andererseits beinhaltet kaum eine andere Abfallfraktion derart viele rückgewinnbare Wertstoffe. In einem komplexen Materialverbund findet man neben den mengenmäßig dominanten Kunststoffen und Eisenmetallen auch Edel- und Sondermetalle. Diese sind pro Gerät nur in geringer Menge enthalten. Wirtschaftlich und ökologisch weisen sie aber im Vergleich zu den anderen Materialien eine hohe Relevanz auf (Hagelüken, 2009). Um Schadstoffe sicher zu entsorgen sowie Wertstoffe gezielt rückzugewinnen, sollten daher EAG einer ordnungsgemäßen Sammlung und Behandlung zugeführt werden.

1.1 Zielsetzung der Masterarbeit

Als Reaktion auf die rasante Mengenentwicklung von EAG und dem damit verbundenen Rohstoffverbrauch sowie negativen Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen durch eine unsachgemäße Sammlung und Behandlung, wurden von der EU zahlreiche Gesetze verabschiedet. Obwohl diese rechtlichen Rahmenbedingungen den gesamten Produktlebenszyklus reglementieren, fokussieren sich die derzeitigen Verwertungsbemühungen auf die Rückgewinnung der mengenmäßig bedeutenden Fraktionen (Eisenmetalle, Kupfer, Aluminium). Damit können die gesetzlich festgeschriebenen Rückgewinnungsraten leichter erfüllt werden. Hinsichtlich der Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen, die nur in Spuren in den Geräten enthalten sind, ermöglichen die Recyclinginfrastrukturen in Europa keine effiziente Edelmetallrückgewinnung (Chancerel und Rotter, 2009; Chancerel, 2010). Verluste ergeben sich vor allem am Beginn der Recyclingkette durch die nicht-getrennte Sammlung der wertstoffreichen EAG sowie durch eine mangelnde Behandlung, vor allem bei der Aufbereitung. Chancerel et al. (2010) schätzen, dass in Deutschland abhängig von der Geräteart nur 29 bis 61 % des in EKG enthaltenen Goldes nach der Aufbereitung auch tatsächlich in der Endverarbeitung rückgewonnen werden können.

Nach Umsetzung der europäischen EAG-Richtlinie werden EAG in Österreich gemäß der EAG-Verordnung in fünf Kategorien (Elektrogroßgeräte, Kühl- und Gefriergeräte, Elektrokleingeräte, Bildschirmgeräte und Gasentladungslampen) gesammelt. In der Kategorie Elektrokleingeräte (EKG) finden sich einerseits Geräte mit einem geringen Wertstoffanteil (wie Küchengeräte), andererseits Geräte mit einem hohen Wertstoffanteil (wie Geräte der Informations- und Kommunikationstechnologie-IKT). Als Wertstoffe sind vor allem die Edelmetallträger interessant. Diese findet man hauptsächlich in den Leiterplatten der Geräte der IKT und der Unterhaltungselektronik (Salhofer et al., 2009; Blaser, 2012). Bei einer Behandlung eines gemischten Inputs an EKG (Geräte mit hohem und geringem Wertstoffanteil) gibt es in der Literatur die Hypothese, dass die Behandlung zu wenig auf die Rückgewinnung von hochwertigen Komponenten ausgerichtet ist (Goosey und Kellner, 2002; Chancerel et al., 2009; Meskers und Hagelüken, 2009). Wertvolle Ressourcen wie Edelmetalle werden daher nur in geringem Umfang zurückgewonnen. Für eine gezielte Behandlung können wertstoffreiche EKG bei den Sammelstellen (Recyclinghöfen) getrennt erfasst oder beim/bei der BehandlerIn vorsortiert werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Umsetzbarkeit einer getrennten Erfassung von wertstoffreichen EKG auf Recyclinghöfen in Österreich zu testen. Dazu wurde 2012 ein wissenschaftlicher Sammelversuch auf fünf Recyclinghöfen durchgeführt.

1.2 Aufbau der Masterarbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in fünf Abschnitte. Zunächst werden die für die Arbeit relevanten Gesetze und rechtlichen Rahmenbedingungen in Europa und in Österreich dargestellt.

Kapitel drei beschäftigt sich mit der Kategorisierung und vielfältigen Materialzusammensetzung von EKG. Weiters wird die Relevanz von Edelmetallen in EKG beschrieben.

Kapitel vier gibt einen Überblick über die Sammlung und Behandlung von EKG. Zunächst wird die Bedeutung der einzelnen Schritte des gesamten Recyclingprozesses erläutert. Danach erfolgt die Darstellung von möglichen und praktizierten Sammelsystemen, wobei ein Vergleich zwischen der österreichischen Bundeshauptstadt Wien mit zwei skandinavischen Städten als Best-Practice-Beispiele gezeigt wird. Außerdem werden Gründe für Sammelverluste genannt. Des Weiteren wird die Wichtigkeit einer gezielten Behandlung von EKG, insbesondere bei der Aufbereitung verdeutlicht. Das Kapitel schließt mit einer Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten und Vorteile der Edelmetallrückgewinnung aus EKG sowie der Probleme der informellen Behandlung.

Kapitel 5 schildert die Ziele, Vorgehensweise und Ergebnisse des durchgeführten Sammelversuchs zur getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf fünf Recyclinghöfen im österreichischen Bundesland Tirol. Zusätzlich wurde auf Basis von Daten zur Verteilung der gesammelten Kleingerätearten in Wien (KERP, 2011) eine Analyse hinsichtlich der in EKG enthaltenen Wertstoffe Gold, Silber und Palladium durchgeführt.

Den Abschluss der Arbeit bilden Schlussfolgerungen sowie Zusammenfassungen der wichtigsten Aussagen.

2. Gesetze und rechtliche Rahmenbedingungen

Um auf die rasante Mengenentwicklung von EAG und dem damit verbundenen Rohstoffverbrauch sowie Umwelt- und Gesundheitsbelastungen durch eine unsachgemäße Sammlung und Behandlung zu reagieren, wurden vom Europäischen Parlament und vom Rat der EU die Richtlinien 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-RL; Waste Electrical and Electronic Equipment Richtlinie) und die Richtlinie 2002/95/EU (RoHS; Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances) verabschiedet. Beide Richtlinien wurden mittlerweile novelliert. Im Hinblick auf den Export von EAG hat die EU das sogenannte Basler Übereinkommen der Vereinten Nationen unterzeichnet und die Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 für grenzüberschreitende Abfallverbringungen erlassen. Österreich hat mit der Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO) die WEEE-RL und die RoHS umgesetzt. Das folgende Kapitel beschreibt die wesentlichen EAG-Rechtsvorschriften in Europa und Österreich.

2.1 Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Die bisherige europäische Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-RL; Waste Electrical and Electronic Equipment Richtlinie) ist seit Februar 2003 in Kraft. Wichtige Ziele der WEEE-RL stellen die Vermeidung, die Wiederverwendung und die Verwertung von Geräten und Materialien dar. Die Förderung einer umweltgerechten Produktkonzeption soll die Erreichung dieser Ziele erleichtern. Die WEEE-RL beinhaltet Regelungen zu Kennzeichnung, Sammlung, Verwertung und Behandlung von EAG sowie deren Finanzierung. Sie verpflichtet die Mitgliedstaaten zum Aufbau von nationalen Infrastrukturen für die Sammlung und Behandlung von EAG. Im Rahmen der Produzentenverantwortung sind für Sammlung, Transport und eine sachgerechte Verwertung und Entsorgung HerstellerInnen und ImporteurInnen verantwortlich. Eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit sowie der Umwelt durch in EAG enthaltene Schadstoffe soll damit verhindert werden (Tesar und Öhlinger, 2009).

Die Europäische Kommission schlug im Dezember 2008 eine Neufassung der WEEE-RL vor. Die revidierte europäische Richtlinie 2012/19/EU über EAG trat schließlich im August 2012 in Kraft. Die bisherige WEEE-RL (2002/96/EG) wird zum 15. Februar 2014 aufgehoben. Nun sind die Mitgliedstaaten dazu verpflichtet, die erforderlichen Rechts- und Verwaltungsvorschriften innerhalb von 18 Monaten in nationales Recht umzusetzen. Daher ergeben sich für die von der WEEE-RL betroffenen AkteurInnen nach Novelle der relevanten nationalen Gesetzgebung (zum Beispiel der österreichischen EAG-VO) einige Änderungen:

Der Geltungsbereich der WEEE-RL wird ab 2018 offen gestaltet und um sämtliche EAG erweitert. Die bisher genannten zehn Gerätekategorien werden durch die folgenden sechs Gerätekategorien ersetzt:

1. Wärmeüberträger
2. Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm² enthalten
3. Lampen
4. Großgeräte (eine der äußeren Abmessungen beträgt mehr als 50 cm)
5. Kleingeräte (keine äußere Abmessung beträgt mehr als 50 cm)
6. Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte (keine äußere Abmessung beträgt mehr als 50 cm)

(Richtlinie 2012/19/EU)

Die in dieser Arbeit behandelten EAG fallen in die Kategorien 5 und 6.

Die bisher geltende gesetzliche Sammelquote für EAG beträgt 4 kg/EW.a. Bis 2019 wird sie schrittweise auf mindestens 65 % der in den Vorjahren auf den Markt gebrachten Elektrogeräte oder alternativ 85 % der gesamten anfallenden EAG angehoben. Die Verwertungs- und Wiederverwendungsquoten werden bis 2018 um 5 % erhöht. EAG, die unter die Gerätekategorien 5 oder 6 fallen, müssen dann zu 75 % verwertet bzw. zu 55 % wiederverwendet werden. Im Rahmen der Novelle werden zusätzlich die VertreiberInnen von Elektro- und Elektronikgeräten in die (Rücknahme-) Pflicht genommen, sofern sie über eine Verkaufsfläche von mindestens 400 m² verfügen. Sie sind verpflichtet, direkt oder in unmittelbarer Nähe für EndnutzerInnen Einrichtungen zur kostenfreien Sammlung von sehr kleinen EAG (keine der äußeren Abmessungen beträgt mehr als 25 cm) zur Verfügung zu stellen. Hinsichtlich der Verbringung gebrauchter Elektro- und Elektronikgeräte gelten in Zukunft stärkere Restriktionen. Beispielsweise muss der/die BesitzerIn Nachweise erbringen, dass es sich bei den exportierten Geräten um funktionsfähige Gebrauchtgeräte handelt (N.N., 2012).

2.2 Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

Die Verwendung gefährlicher Stoffe in EAG wird durch die Richtlinie 2011/65/EG (RoHS-Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances) eingeschränkt. Für Schwermetalle (Blei, Quecksilber, Cadmium) und Flammschutzmittel (wie polybromiertes Biphenyl (PBB) und polybromierter Diphenylether (PBDE)) werden in Anhang II zulässige Höchstkonzentrationen in homogenen Werkstoffen in Gewichtsprozent angeführt. Die Stoffe müssen aus den Produkten und Komponenten ersetzt werden. Die RoHS-RL trat am 21. Juli 2011 in Kraft und ersetzt die bisherige Richtlinie. Durch den Recast wurde der Geltungsbereich auf sämtliche Elektro- und Elektronikgeräte, Kabel und Ersatzteile erweitert. Ausnahmen werden gesondert in Artikel 2(4) genannt. Außerdem wurde damit die Richtlinie mit anderen europäischen Regelwerken, wie zum Beispiel der Verordnung (EG)

Nr. 1907/2006 (REACH-Verordnung; Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) harmonisiert (Europäische Kommission, 2012).

2.3 Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung

Im Hinblick auf den Export von EAG hat die EU das Basler Übereinkommen der Vereinten Nationen vom 22. März 1989 unterzeichnet. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Arbeit hat es 192 Vertragsparteien. Das Übereinkommen trat 1992 in Kraft und regelt Kontrollverfahren für die grenzüberschreitende Verbringung und die Entsorgung von für die Umwelt und den Menschen gefährlichen Abfällen. Durch die Regelungen soll das Handelsvolumen derartiger Abfälle dezimiert werden um dadurch Gesundheits- und Umweltschutzziele zu erreichen. Demnach ist eine grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen nur dann zulässig, wenn der Einfuhrstaat eine schriftliche Einwilligung zur Einfuhr dieser Abfälle erteilt hat. Zusätzlich müssen den betroffenen Staaten Informationen über den geplanten Transport mittels eines Notifizierungsformulars übermittelt werden. Weiters legt das Übereinkommen fest, welche Abfälle aufgrund ihrer Herkunft, Zusammensetzung und Eigenschaften als gefährliche Abfälle einzustufen sind (Europäische Union, 2006).

2.4 Elektroaltgeräteverordnung

Österreich hat mit der Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO) die WEEE-RL und die RoHS-RL umgesetzt. Kernregelungen der EAG-VO betreffen bestimmte Stoffverbote, die Rückgabe und Sammlung, die Qualität der Verwertung sowie die Wiederverwendung und Behandlung von EAG. Dabei wurde ein System mit geteilter Verantwortung festgelegt. Alle Beteiligten übernehmen somit einen Teil der Verantwortung und der Kosten.

- Die HerstellerInnen und ImporteurInnen übernehmen die abfallwirtschaftliche Produktverantwortung für EAG. Diese Verantwortung umfasst die Finanzierung der Sammlung ab der Sammelstelle, die Verwertung und die Beseitigung. Weiters müssen sie Registrierungs- und Meldeverpflichtungen erfüllen.
- Die Verantwortung des größeren Handels besteht in der kostenlosen Rücknahmeverpflichtung für EAG aus privaten Haushalten bei einem gleichartigen Produktneukauf (1:1 Regelung).
- Der/die EndverbraucherIn übernimmt die Verantwortung, die EAG in ein dafür eingerichtetes Sammelsystem einzubringen.
- Kommunen bzw. deren Abfallwirtschaftsorganisationen sollen eine konsumentInnennahe Sammlung sicherstellen sowie Öffentlichkeitsarbeit leisten.

- Bedeutende Koordinationsaufgaben in der Sammlung und Abholung von EAG übernimmt die Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.
- Schließlich obliegt der Entsorgungswirtschaft die rechtskonforme Verwertung sowie Entsorgung der gesammelten EAG

(Maschinda und Widinski, 2003; BMLFUW, 2011a).

In der EAG-VO werden die zehn Gerätekategorien der bisher geltenden WEEE-RL folgenden fünf Sammel- und Behandlungskategorien zugeteilt. Hierbei findet sowohl eine Zusammenfassung als auch eine Aufteilung der Gerätekategorien statt.

1. Großgeräte (größte Kantenlänge größer oder gleich 50 cm)
2. Kühl- und Gefriergeräte
3. Bildschirmgeräte einschließlich Bildröhrengeräte
4. Elektrokleingeräte (größte Kantenlänge kleiner als 50 cm)
5. Gasentladungslampen

Die in dieser Arbeit behandelten EAG fallen in die Kategorie 4.

Für EKG wird je nach Gerätekategorie der bestehenden WEEE-RL eine Verwertungsquote von 70 % bzw. 75 % des durchschnittlichen Gerätegewichts festgelegt. Die Wiederverwendungsquote liegt bei 50 % bzw. 65 % des durchschnittlichen Gerätegewichts. Die Erreichung dieser Quote ist allerdings aufgrund der Sortenvielfalt, der unterschiedlichen Nutzungsdauern sowie fehlender Daten des Handels über netto-Sammel- und Behandlungsmassen schwer zu überprüfen.

2.5 Abfallbehandlungspflichtenverordnung

Die Verordnung über Behandlungspflichten von Abfällen, BGBl. II Nr. 459/2004, trat mit 1. Jänner 2005 und Bestimmungen für EAG mit 13. August 2005 in Kraft. In der Verordnung werden generell Mindestanforderungen an Sammlung, Lagerung und Behandlung von gefährlichen bzw. nicht gefährlichen Abfällen festgelegt. Beispielsweise müssen polychlorierte biphenyl- (PCB) haltige oder quecksilberhaltige Bauteile, Batterien und Akkumulatoren sowie Leiterplatten (sofern sie eine Mindestgröße überschreiten) von EAG entfernt und ordnungsgemäß behandelt werden. Sollte der/die AbfallbesitzerIn (AbfallersterzeugerIn, AbfallsammlerIn oder -behandlerIn) als Verpflichtete/r zu einer ordnungsgemäßen Behandlung nicht berechtigt oder imstande ist, hat er/sie die Abfälle einem/einer befugten AbfallsammlerIn oder -behandlerIn zu übergeben (BMLFUW, 2011b).

3. Recyclingrelevante Eigenschaften von Elektrokleingeräten

3.1 Definitionen und Gerätekategorisierung

Elektro- und Elektronikgeräte (EEG) benötigen für ihren ordnungsgemäßen Betrieb elektrischen Strom oder elektromagnetische Ströme und Felder. Nach ihrer Nutzungsphase fallen sie als Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) an. Unter dem Begriff Elektroaltgeräte versteht man laut europäischer Rechtsprechung jene EAG, „die als Abfall gelten, einschließlich aller Bauteile, Unterbaugruppen und Verbrauchsmaterialien, die zum Zeitpunkt der Entledigung Teil des Produkts sind“ (Richtlinie 2012/19/EU). Huisman et al. (2007) und Martens (2011) beschreiben EAG als einen komplexen Abfallstrom aufgrund

- der großen Vielfalt der Gerätetypen und der HerstellerInnen,
- dem komplexen Aufbau aus einer Vielzahl an Konstruktions- und Funktionsbauteilen,
- der ständigen Miniaturisierung der Bauteile,
- der unterschiedlichen Material- und Stoffzusammensetzung (häufig im Verbund),
- des Schadstoffgehalts, sowie
- des rasanten Mengenwachstums, welches von diversen Faktoren abhängt (steigende Produktnachfrage, rasche Veränderung der Technologien, des Designs und des Marketings).

Elektrokleingeräte (EKG) umfassen laut der zehn Gerätekategorien des Anhangs IB der bisherigen WEEE-RL mit Ausnahme von Haushaltsgroßgeräten (1. Kategorie) und automatischen Ausgabegeräten (10. Kategorie) sämtliche Kategorien:

2. Haushaltskleingeräte
3. IT- und Telekommunikationsgeräte
4. Geräte der Unterhaltungselektronik
5. Beleuchtungskörper
6. Elektrische und elektronische Werkzeuge (mit Ausnahme ortsfester industrieller Großwerkzeuge)
7. Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte
8. Medizinische Geräte (mit Ausnahme aller implantierten und infizierten Produkte)
9. Überwachungs- und Kontrollinstrumente

Huisman et al. (2007) verwenden Subkategorien zur weiteren Einteilung der Geräte. Demnach umfassen EKG folgende in Tabelle 1 aufgelisteten Kategorien, da sie üblicherweise zusammen gesammelt und behandelt werden:

Nr.	Subkategorie	Typische Gerätearten	Anteil (Masse-%)
1C	Haushaltsgroßgeräte klein (<50 cm)	Mikrowellenherd, elektr. Heizgerät	3,6
2	Haushaltskleingeräte	Staubsauger, Toaster, Bügeleisen, Wasserkocher, Ventilator, elektr. Zahnbürste	7
3A	Informations- und Kommunikationstechnologie (exkl. Bildschirmgeräte)	PC, Drucker, Telefon, Laptop	8
4A	Unterhaltungselektronik (exkl. Bildschirmgeräte)	Videorekorder, Stereoanlage, Lautsprecherbox, Radio, Fernbedienung, SAT-Receiver, DVD/CD-Player	7,8
5A	Beleuchtungskörper	Lampe	0,7
6	Werkzeug	Rasenmäher, Pumpe, Heckenschneider	3,5
7	Spielzeug	Spielkonsole	0,1
8	Medizinische Geräte	Blutdruckmessgerät	0,1
9	Überwachungs- und Steuerungsgeräte	Rauchmelder	0,2
	Gesamt		31

Tabelle 1: Zusammensetzung von EKG, Anteile der Subkategorien und Beispiele für typische Gerätearten in der Gesamtmenge EAG Europas (nach Huisman et al., 2007)

Aus Tabelle 1 ist erkennbar, dass EKG eine sehr inhomogene Sammel- und Behandlungskategorie darstellen. Gemessen am Anteil der gesammelten EAG in Europa ist innerhalb der EKG die Gerätekategorie der IKT die mengenmäßig bedeutendste. Danach folgen die Geräte der Unterhaltungselektronik sowie die Haushaltskleingeräte. In der Praxis werden manche Gerätearten (zum Beispiel Mikrowellengeräte oder Kopiergeräte) sowohl den Klein- als auch den Großgeräten zugeordnet (Tesar und Öhlinger, 2009).

Obwohl diese Subkategorien oft zusammen gesammelt und behandelt werden, weisen sie untereinander teilweise erhebliche Unterschiede (bezüglich des ökonomischen Wertes und der umweltrelevanten Eigenschaften ihrer Stoffe) auf.

Beispielsweise ist der Wertstoffgehalt der IKT-Geräte im Vergleich zu jenem der Haushaltskleingeräte wesentlich höher (Kapitel 3.2). Bei einer Behandlung von gemischtem Input an EKG (Geräte mit hohem und geringem Wertstoffanteil) ist die Behandlung zu wenig auf die Rückgewinnung von hochwertigen Komponenten ausgerichtet. Daher werden wertvolle Ressourcen wie Edelmetalle nur in geringem Umfang zurückgewonnen (Kapitel 4.2). Huisman et al. (2007) schlagen deshalb folgende Geräteeinteilung vor:

1. Geräte mit hohem Metallanteil (vor allem Kategorie 1C), die gemeinsam mit größeren Geräten der Kategorie 1A behandelt werden können,
2. Geräte mit hohem Kunststoffanteil (vor allem die Kategorien 2, Teile von 3A, 4A, 6 und 7), für die eine gezielte Kunststoffverwertung sinnvoll ist, sowie
3. Geräte mit hohem Edelmetallgehalt (Kategorie 3A, PCs und Mobiltelefone, inklusive DVD-Player etc. von 4A).

Allerdings betonen Huisman et al. (2007), dass es schwierig ist, mit den verfügbaren Daten eine eindeutige Auswahl von jenen wertstoffreichen Geräten zu erstellen, die für ein auf die Rückgewinnung von Edelmetallen fokussiertes Recycling geeignet sind. Oguchi et al. (2011) untersuchten diesbezüglich die Eigenschaften bestimmter EAG-Arten als Sekundärressourcen für eine effiziente Edelmetallrückgewinnung. Große EAG wie Waschmaschinen, Kühlschränke und andere Kühlgeräte sowie Röhrenbildschirmgeräte wurden als die wichtigsten Quellen für unedle Metalle identifiziert. Camcorder, Digitalkameras, Mobiltelefone, PCs, tragbare Audiogeräte und Videospielekonsolen stellen die bedeutendsten Edelmetallquellen dar. Andere mittelgroße IKT-Geräte (zum Beispiel Drucker) und Geräte der Unterhaltungselektronik (DVD-Player) spielen zusätzlich bei der Rückgewinnung von selteneren unedlen Metallen eine Rolle.

Im Zuge der Novellierung der WEEE-RL werden die bisher bekannten 10 Gerätekategorien durch die in Kapitel 2.1 erwähnten 6 offenen Kategorien ersetzt. Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte werden nun als eigene Kategorie ausgewiesen, da diese „viele Rohstoffe“ enthalten (Florenz, 2011, 64). Kategorie 6 umfasst Laptops, Notebooks, Tablets und kleine IT- und Telekommunikationsgeräte (wie PCs, Drucker, Taschenrechner, Telefone, Mobiltelefone, Router, Funkgeräte, Babyphones, Beamer) und deckt sich großteils mit Huismans et al. (2007) 3. Sammlungs- und Verwertungskategorie.

3.2 Materialzusammensetzung von EKG

Aufgrund der immer kürzer werdenden Innovationszyklen sowie der enormen Produktvielfalt bestehen EAG aus einer komplexen Mischung von Materialien und Bauteilen. Manche dieser Stoffe sind ökonomisch wertvoll. Das heißt, sie werden durch die Behandlung der Geräte gewonnen und weisen einen positiven Deckungsbeitrag auf (abhängig von der jeweiligen Qualität der Wertstoffe und der aktuellen Situation auf den Rohstoffmärkten). Neben den Metallen sind vor allem die Edelmetallträger als Wertstoffe bedeutend. Man findet sie hauptsächlich in den Geräten der IKT sowie der Unterhaltungselektronik (Salhofer et al., 2009).

Wertstoffe bilden laut Martens (2011) insbesondere:

- Stahl in Gehäusen und Funktionsteilen
- Kupfer in Motoren, Transformatoren, Spulen, Kabeln, Leiterbahnen
- Aluminium in Chassis, Kühlelementen
- Gold, Palladium und Silber in Kontakten, Bonddrähten, Batterien
- Zinn, Blei, Silber und Wismut in Loten
- Zink, Nickel, Kobalt und Mangan in Batterien
- Zink in Leuchtschichten
- seltene Metalle/Halbmalle (wie Tantal in Kondensatoren; Indium in Liquid Crystal Display (LCD)-Bildschirmen, Mobiltelefonen, Light Emitting Diodes (LEDs) und Dünnschichtsolarzellen; Ruthenium in Festplattenlaufwerken und Widerständen; Selen in Kopiergeräten)
- seltene Erden in Leuchtstoffen (Yttrium, Europium) und Batterien (Lanthan)
- Kunststoffe (ABS-Acrylnitril-Butadien-Styrol, PP-Polypropylen) in Gehäusen und Formteilen
- Glas bei Bildschirmen und Anzeigen

Andere in den Geräten enthaltene Stoffe besitzen wiederum gesundheits- und umweltgefährliche Eigenschaften, weshalb sie einer ordnungsgemäßen Sammlung und Behandlung zugeführt werden müssen. Das Schadstoffpotential ergibt sich beispielsweise durch folgende Stoffe:

- PCB in Kondensatoren und Transformatoren
- PBDE als Flammschutzmittel in PC-Gehäusen, Platinen und Kabeln
- Quecksilber in Schaltern, Leuchtstoffröhren, Batterien und Hintergrundbeleuchtung von LCDs
- Blei und Cadmium in Akkumulatoren und Batterien, im Bildschirmglas und zum Teil in Kunststoffen
- Chromverbindungen

(Martens, 2011)

Hinsichtlich der Massenanteile von Wert- und Schadstoffen in EKG werden nun beispielhaft die Ergebnisse zweier Untersuchungen aus den Jahren 2008 und 2006 dargestellt. Diese verdeutlichen die vielfältige Stoffzusammensetzung von EKG.

Freegard und Claes (2009) führten im Zeitraum von April bis Juni 2008 einen Sammelversuch im englischen Bury St. Edmunds (Grafschaft Suffolk) durch. Dabei wurden insgesamt 2,808 t EKG von 20.000 Haushalten im Holsystem gesammelt. Die Geräte wurden sortiert und den jeweiligen Gerätekategorien der WEEE-RL zugeteilt. Anschließend wurden 300 Geräte ausgewählt und manuell demontiert, um deren Materialzusammensetzung zu bestimmen. Davon fiel ein Großteil der Geräte in die Kategorien 2, 3 und 4 von Anhang IB der WEEE-RL. In Tabelle 2 wird die Materialzusammensetzung der Gerätekategorien dargestellt. Eisenmetalle und Kunststoffe bilden die dominierenden Materialien in allen Kategorien. Leiterplatten wurden vor allem in den Kategorien 3, 4, 7 und 8 gefunden.

Materialfraktion	Gerätekategorie							
	2	3	4	5	6	7	8	9
Eisenmetalle	53	32	52	36	60	19	31	33
Kabel	9	4	3	11	12	2	1	1
Leiterplatten	1	14	13	3	0	14	22	9
Batterien	1	0	0	8	-	-	-	0
Kunststoffe	34	43	21	33	28	64	46	56
Glas	0	3	0	5	-	-	-	-
LCD	-	0	-	-	-	-	-	-
Sonstiges	1	3	10	4	0	1	-	-
Gesamt	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 2: Materialzusammensetzung von EKG nach Gerätekategorien [Masse-%] (nach Freegard und Claes, 2009)

Dimitrakakisa et al. (2008) führten im zweiten Halbjahr 2006 eine Untersuchung über EKG im Restmüll durch. Es wurden jeweils etwa 5 t Restmüll aus den Haushalten dreier unterschiedlicher Bezirke der deutschen Stadt Dresden gesammelt. Circa 64.000 EinwohnerInnen waren davon betroffen. Insgesamt befanden sich rund 180 kg EKG in der Gesamtsammelmasse. Eine Einteilung der Geräte nach Anhang IB der WEEE-RL ergab, dass Haushaltskleingeräte und die Geräte der Unterhaltungselektronik mehr als 60 % der Gesamtsammelmasse darstellten. Die Geräte der IKT nahmen 4,5 Masse-% ein. Danach wurden die Geräte auf ihre Materialzusammensetzung untersucht. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse für die einzelnen Gerätekategorien zusammen. Bei der Untersuchung wurden sogar Geräte der Kategorien 1 und 10 gefunden, die normalerweise aufgrund ihrer Beschaffenheit (Größe, Gewicht) nicht in Restmülltonnen eingebracht werden können. Kunststoffe dominieren die Kategorien 2 und 7. Bei den restlichen Kategorien beträgt der Kunststoffanteil zwischen 25 und 30 %. Die Kategorien 5, 8, 9 und 10 müssen bei dieser Betrachtung ausgeklammert werden, da die Anzahl der untersuchten Geräte nicht repräsentativ ist. In Kategorie 1 beträgt der Kunststoffanteil unter 10 %. Diese Kategorie weist aber den höchsten Eisenmetallanteil auf. Die Kategorien 4, 5 und 6 weisen einen hohen Anteil an elektronischen Komponenten auf. Leiterplatten konnten hauptsächlich in den Geräten der IKT nachgewiesen werden.

Material fraction	EEE Category									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ferrous metals	51.60	8.99	25.27	12.04	10.40	13.32	2.50	7.42	0.27	-
Non-ferrous metals	2.89	8.22	0.09	1.08	-	2.69	0.23	8.12	-	-
Plastics	9.85	40.70	27.49	28.17	24.19	9.18	83.60	29.27	76.62	69.48
Rubber	0.05	0.69	0.79	0.54	-	0.21	1.12	3.25	0.22	-
Cables	3.00	7.55	3.34	2.80	0.77	7.02	2.26	-	0.46	8.50
PWBs	0.08	0.52	10.17	6.77	-	0.92	3.84	-	22.44	4.33
Electr(on)ic components	28.16	18.41	4.45	38.48	64.64	66.11	3.92	20.09	-	1.48
"Bonded" materials	4.35	11.77	11.09	5.28	-	0.53	0.004	-	-	15.32
Various	-	2.53	14.03	3.00	-	0.04	1.91	31.84	-	-
Batteries	-	0.49	2.63	1.74	-	-	0.53	-	-	0.33
LCDs	-	0.12	0.64	0.08	-	-	0.09	-	-	0.56

Tabelle 3: Materialzusammensetzung von EKG nach Gerätekategorien [Masse-%] (nach Dimitrakakisa et al., 2008)

3.3 Bedeutung von Edelmetallen in EKG

Zu den Edelmetallen zählen die Elemente Gold, Silber sowie die Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, Iridium Ruthenium und Osmium). In EKG werden sie aufgrund ihrer besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften wie Härte, hohe Schmelzpunkte, Korrosionsbeständigkeit und gute elektrische Leitfähigkeit eingesetzt. Bedeutende Edelmetallkonzentrationen findet man beispielsweise in elektronischen Bauteilen, Kontakten oder Leiterplatten. Um Legierungen oder metallische Oberflächenbeschichtungen herzustellen liegen sie häufig mit anderen Materialien (Basismetalle, Kunststoffe etc.) in einem komplexen Verbund vor. Zum Beispiel wird in modernen Mobiltelefonen wegen der steigenden Komplexität hinsichtlich Funktionsweise und Design, ein immer höherer Anteil an Edelmetallen für zahlreiche Bauteile benötigt. Laut Singhal (2006) besteht ein Mobiltelefon aus 500 bis 1000 verschiedenen Komponenten. Die Edelmetalle Silber und Palladium werden für Elektroden der Vielschichtkondensatoren verwendet. Ohne den Einsatz von Platin und Rhodium müsste man auf klare LCD-Anzeigen verzichten. Schließlich sorgen Goldkontakte für eine hohe elektrische Leitfähigkeit (Hagelüken, 2010a).

Relevante Edelmetallkonzentrationen findet man vor allem in den Leiterplatten (Platinen) der Geräte der IKT und den Geräten der Unterhaltungselektronik. Mit ihren darauf fixierten wert- und schadstoffhaltigen elektronischen Bauteilen sind sie ein wesentlicher Bestandteil von EEG. Das Basismaterial der Leiterplatten bilden häufig Glasfasermatten, die mit Epoxidharz getränkt werden. Darauf befinden sich Kupferleiterbahnen sowie aufgelötete elektronische Bauelemente (Transformatoren, Kondensatoren, Batterien, Transistoren, Spulen, Widerstände, Dioden, Schalter, Stecker, Sicherungen etc.). Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung bestehen Leiterplatten und ihre Bauelemente aus verschiedenen Metallen (Aluminium, Eisen, Gold, Kupfer, Nickel, Silber, Zink etc.), Metallverbindungen, Kunststoffen und keramischen Werkstoffen (zum Beispiel Aluminiumoxide) (Martens, 2011; Lee et al., 2012). Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine Leiterplatte aus einem Videorekorder mit ihren wert- und schadstoffhaltigen elektronischen Bauteilen.

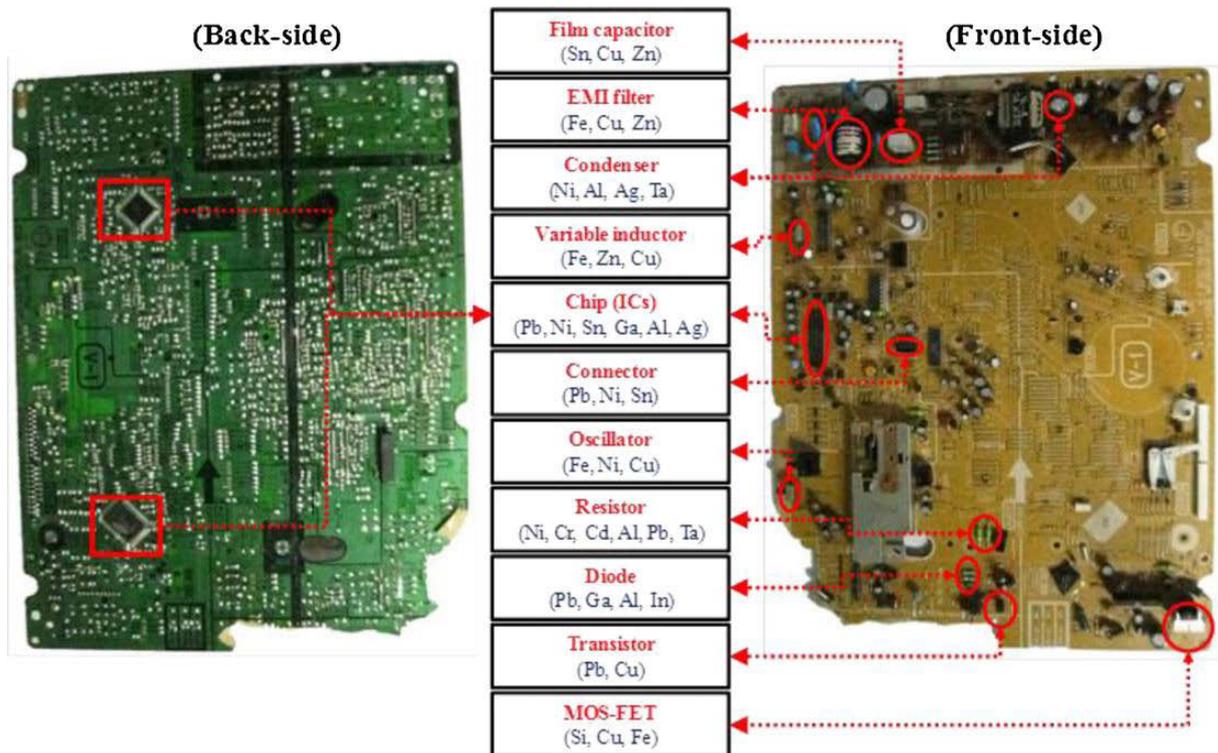


Abbildung 1: Leiterplatte aus einem Videorekorder mit elektronischen Bauelementen (Lee et al., 2012)

Recyclingunternehmen unterscheiden Leiterplatten hauptsächlich aufgrund ihres Edelmetallgehalts grob in folgende Kategorien:

- **Klasse I:** In diese Kategorie fallen hochwertige Leiterplatten aus PCs, Großrechnern, Industriesteuerungen oder Telefonen, die von Anhaftungen (Rahmen, Kühlkörper, Bleche) befreit sind. Sie sind mit einer Vielzahl von wertstoffreichen Bauteilen bestückt (Chips, Integrierte Schaltkreise, Prozessoren) und weisen deutlich sichtbare Vergoldungen auf (wie vergoldete Kanten von Steckern oder Slots für Prozessoren und Grafik- oder Soundkarten).
- **Klasse II:** Leiterplatten aus dieser Kategorie stammen häufig aus der Automobilbranche, Flachbildschirmen, Videorekordern oder Messgeräten. Sie enthalten weniger und kleinere wertstoffreiche Bauelemente als Leiterplatten der Klasse I. Außerdem sind Goldkontakte weniger gut sichtbar. Der Edelmetallgehalt ist allerdings noch deutlich höher als bei Leiterplatten der dritten Kategorie.
- **Klasse III:** In Monitoren, Fernsehern, Netzteilen oder HiFi-Anlagen findet man Platinen dieser Klasse. Sie sind mit daumengroßen wertstoffarmen Bauelementen bestückt (Transformatoren, Kondensatoren, Widerstände oder Kühlkörper). Ihr Edelmetallgehalt ist eher gering und Vergoldungen kaum mehr vorhanden. Daher konzentrieren sich die Recyclingschritte stärker auf die enthaltenen unedlen Metalle.

(ESG, 2013)

Es lassen sich allerdings keine eindeutigen Unterscheidungsmerkmale zwischen den Kategorien feststellen. Jede/r SammlerIn bzw. BehandlerIn von EAG weist eigene Kriterien aufgrund seiner/ihrer technischen und ökonomischen Voraussetzungen für das Recycling auf. Die Klassifizierung der Leiterplatten hat hingegen Einfluss auf den Recyclingprozess, da sich die Behandlung von EKG mit wertstoffreichen Leiterplatten von der Behandlung anderer Geräte unterscheiden kann (Kapitel 4.2) (Deubzer, 2007).

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Konzentrationen von Gold, Silber und Palladium in Leiterplatten aus verschiedenen Gerätetypen. Die Werte können direkt aus der Literatur entnommen werden. Eine vollständige Liste mit allen Ergebnissen befindet sich im Anhang. Wenngleich die Werte der Edelmetallkonzentrationen innerhalb derselben Geräteart teilweise stark schwanken, liegen sie deutlich höher als der Edelmetallgehalt von abgebauten Erzen, der heutzutage häufig unter 10 g/t beträgt.

Geräteart (Herkunft der Leiterplatte)	Quelle	Gold [g/t]	Silber [g/t]	Palladium [g/t]
Camcorder	Oguchi et al., 2011	530	5000	970
Digitalkamera	Chancerel, 2010	863	3057	42
	Oguchi et al., 2011	780	3200	200
Drucker	Huisman et al., 2007	47	350	9
	Oguchi et al., 2011	38	70	21
DVD-Player	Huisman et al., 2007	100	700	21
	Oguchi et al., 2011	150	710	20
Faxgerät	Oguchi et al., 2011	35	69	110
GPS	Ernst et al., 2003	536	5033	688
Kleine IKT-Geräte	Huisman et al., 2008	1300	5700	470
Minidisc Player	Oguchi et al., 2011	940	3400	550
Mobiltelefon	Ernst et al., 2003	368	3573	287
	Hagelüken und Buchert, 2008	980	5540	285
	Oguchi et al., 2011	1500	3800	300
Notebook	Oguchi et al., 2011	630	1100	200
PC	Gmünder, 2007	225	1000	90
	Hagelüken, 2006	250	1000	110
	Huisman et al., 2008	230	1000	90
	Keller, 2006	156	775	99
	Legarth et al., 1995	600	700	100
	Meskers et al., 2009	200	1000	90
	Oguchi et al., 2011	240	570	150
	Yu et al., 2009	230	600	100
Radio	Huisman et al., 2007	68	520	8
	Oguchi et al., 2011	26	170	34
Spielzeug	Huisman et al., 2007	89	365	18
Telefon	Ernst et al., 2003	50	2244	241
Tragbarer CD-Player	Oguchi et al., 2011	370	3700	10
Tragbare Videospielekonsole	Chancerel, 2010	141	609	44
Videorekorder	Oguchi et al., 2011	23	210	50
Videospielekonsole	Oguchi et al., 2011	230	740	43

Tabelle 4: Edelmetallgehalte von unterschiedlichen EKG-Arten

Abbildung 2 vergleicht die Konzentration an Gold, Silber und Palladium zwischen abgebauten Erzen, Leiterplatten, EKG und Siedlungsabfällen. Die Edelmetallkonzentration ist in Leiterplatten am höchsten. Bei Gold und Palladium liegt der Gehalt um ein Vielfaches über jenem von abgebauten Erzen (Rotter und Flamme, 2013).

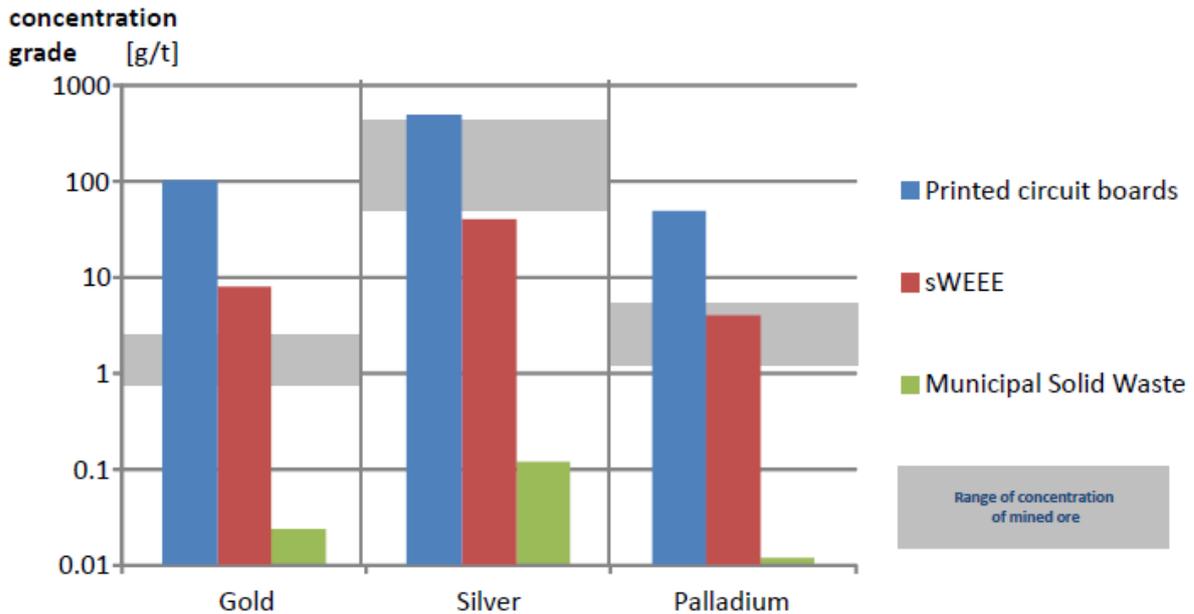


Abbildung 2: Vergleich der Edelmetallkonzentration von Leiterplatten, EKG, Siedlungsabfällen und abgebauten Erzen (nach Rotter und Flamme, 2013)

Obwohl die absolute Menge an Edelmetallen in wertstoffreichen EKG häufig sehr gering ist, weisen sie (aufgrund ihrer hohen Konzentration in den Leiterplatten) im Vergleich zu den mengenmäßig dominanteren Fraktionen (zum Beispiel Eisen und Kunststoffe) eine hohe ökonomische und ökologische Relevanz auf. Die ökonomische Relevanz von Leiterplatten bei der Verwertung von EAG verdeutlicht Tabelle 5. Verglichen werden die Umsatzanteile pro Materialfraktion zwischen verschiedenen EAG-Arten. Die Einnahmen, die durch den Verkauf von Leiterplatten erzielt werden machen mehr als 60 % der Gesamteinnahmen aus (Blaser und Schluep, 2012).

	PC (tower)	CRT monitor	LCD monitor	laptop	printer	CRT TV	LCD TV	appliances	all
Cu	0.1%	49.2%	2.1%	8.0%	13.8%	33.5%	2.0%		19.6%
Al	6.7%	4.6%	3.3%	6.5%	0.4%	0.0%	3.0%		3.4%
Fe	18.6%	4.2%	6.9%	9.5%	8.5%	8.0%	6.2%		10.1%
PWB high grade	0.0%	0.0%	84.6%	0.0%	0.0%	0.0%	87.4%		13.4%
PWB medium grade	66.1%	0.0%	0.0%	64.2%	72.9%	0.0%	0.0%		28.1%
PWB low grade	4.1%	42.0%	0.0%	0.0%	0.0%	58.5%	0.0%		23.3%
cables	4.3%	0.0%	3.1%	2.0%	4.4%	0.0%	1.5%		2.0%
batteries	0.0%	0.0%	0.0%	9.8%	0.0%	0.0%	0.0%		0.1%

Tabelle 5: Umsatzanteile von Materialien aus verschiedenen EAG-Arten (Blaser und Schluep, 2012)

Hagelüken und Meskers (2008) schätzen den durchschnittlichen Edelmetallgehalt eines Mobiltelefons auf 250 mg Silber, 24 mg Gold und 9 mg Palladium (Tabelle 6).

	Mobile phones		PCs and laptops	
	Per unit (mg)	Global demand (t)	Per unit (mg)	Global demand
Ag	250	300	1 000	255
Au	24	29	220	56
Pd	9	11	80	20
Cu	9 000	11 000	500 000	128 000
Co*	3 800	4 500	65 000	6 500**

* assuming all batteries are Li-ion. ** from 100 million laptops.

Tabelle 6: Nachfrage bei Metallen für Mobiltelefone, PCs und Laptops basierend auf den weltweiten Verkäufen 2007 (1200 Mio. Stück Mobiltelefone, 255 Mio. Stück PCs und Laptops) (Meskers und Hagelüken, 2008)

Pro Stück betrachtet handelt es sich um eine geringe Menge. Nimmt man allerdings den Edelmetallgesamtgehalt der weltweit 1,2 Milliarden verkauften Mobiltelefone 2007, so ergibt sich eine Menge von 300 t Silber, 29 t Gold sowie 11 t Palladium. Werden dazu die Edelmetallmengen addiert, die für die jährliche Produktion von PCs benötigt werden, ergibt dies für diese beiden Geräte einen Anteil von 3 % der Weltminenproduktion von Silber, 4 % von Gold und 16 % von Palladium. Gold ist vor allem für Leiterplatten und andere Edelmetallträger der Geräte der IKT wertbestimmend (Cui und Zhang, 2008). Zusammen mit Silber und Palladium bringt es mehr als 80 % des Werts (Tabelle 7).

	Kunststoffe	Fe	Al	Cu	Ag	Au	Pd
Material	23%	7%	5%	18%	1000 ppm	250 ppm	100 ppm
Wert		0%	1%	14%	5%	65%	14%

Tabelle 7: Abschätzung der Zusammensetzung und Wertanteile von Leiterplatten aus PCs (Richtwerte, Werte können innerhalb der Kategorie deutlich abweichen) (nach Meskers et al., 2009)

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Vergleich des Aufkommens an Kleingeräten in Deutschland im Jahr 2007 mit der Herkunft des insgesamt in den Geräten enthaltenen Goldes. Zur groben Unterscheidung von kleinen und großen Kleingeräten wählten Chancerel und Rotter (2009) ein Gewicht von 1 kg. Wertstoffreiche Kleingeräte weisen in dieser Untersuchung in den Leiterplatten eine Goldkonzentration ≥ 1000 g/t auf. Wenngleich Mobiltelefone und PCs zusammen nur knapp 6 % des Gesamtaufkommens bilden, enthalten sie nahezu 40 % des insgesamt in den Kleingeräten vorhandenen Goldes. Trotz erheblich geringerem Massenanteil im Vergleich zu PCs, besitzen Mobiltelefone eine höhere Goldkonzentration. Bei den kleinen wertstoffreichen Kleingeräten (Digitalkameras, MP3-Player, tragbare Videospielkonsolen) betrug 2007 der Anteil am Kleingeräteaufkommen lediglich 0,5 %. Sie sorgten aber für 5 % des Goldaufkommens. Chancerel und Rotter (2009) erwarten speziell bei diesen Geräten einen starken Anstieg des Aufkommens in naher Zukunft. Große wertstoffreiche Kleingeräte (DVD-Player, Laptops, Videospielkonsolen) tragen mehr zum Goldaufkommen bei als wertstoffarme Kleingeräte (Bohrmaschinen, Fernbedienungen, Kaffeemaschinen, Radios, Spielzeuge, Staubsauger), obwohl ihr Anteil am Gesamtaufkommen deutlich geringer ist (17,1 % gegenüber 76,5 %).

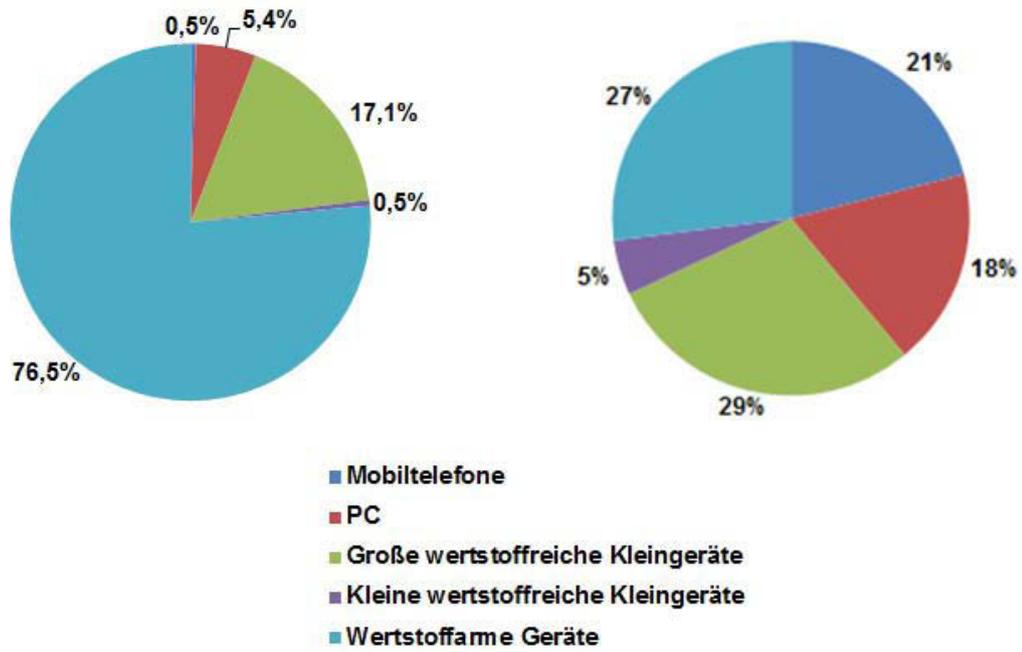


Abbildung 3: Vergleich des Aufkommens an EKG (links) und der Herkunft des insgesamt in EKG enthaltenen Goldes (rechts) (nach Chancerel und Rotter, 2009)

4. Sammlung und Behandlung von EKG

Durch die zunehmende globale Verknappung und damit Verteuerung von Primärrohstoffen sowie durch die mit der Primärförderung verbundenen negativen Umweltauswirkungen erlangt die Rückgewinnung von Edelmetallen und anderen Wertstoffen aus EAG stetig an Bedeutung. Modernes Recycling von EAG führt zu einer Erhöhung der Versorgungssicherheit mit Wertstoffen sowie einer Energieeinsparung im Vergleich zur Primärproduktion. Umwelt- und gesundheitsgefährdende Stoffe werden zudem ordnungsgemäß behandelt (Hagelüken und Meskers, 2008).

Mit modernen Recyclingtechnologien lassen sich heutzutage hohe Rückgewinnungsraten für Edelmetalle und andere Wertstoffe erzielen. Voraussetzung dafür ist eine vorgeschaltete Prozesskette mit den aufeinander abgestimmten Vorgängen Sammlung, Sortierung, Aufbereitung bzw. Demontage (Abbildung 4).

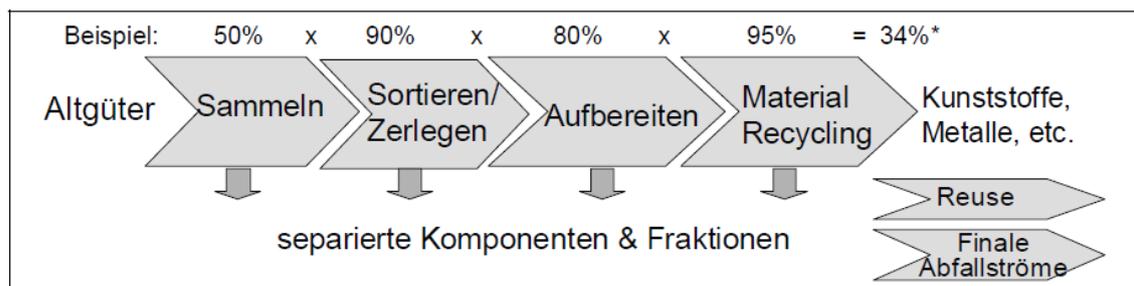


Abbildung 4: Recyclingkette für Konsumgüter (*Die Metallausbeute der Kette bezieht sich auf ein Metall in einer bestimmten Produktgruppe.) (Hagelüken, 2010b)

Durch diese Vorgehensweise soll eine möglichst vollständige Erfassung der EKG erreicht werden. Danach können die darin enthaltenen wert- und schadstoffhaltigen Komponenten abgetrennt werden. Falls erforderlich erfolgt eine tiefere Aufbereitung für die anschließenden Recyclingverfahren. Bei Edelmetallen handelt es sich derzeit dabei vor allem um pyro- bzw. hydrometallurgische Verfahren, die in Kapitel 4.3 näher beschrieben werden. Die eigentliche Wertstoffrückgewinnung findet also erst am Ende der Prozesskette statt. Um hohe Ausbeuten an Wertstoffen zu erreichen und sie wieder so effektiv wie möglich den Märkten zur Verfügung zu stellen, sind die vorangestellten Schritte entscheidend. Gehen beispielsweise Edelmetalle dissipativ in mengenmäßig dominanteren Fraktionen (zum Beispiel durch Shreddern ganzer Geräte) verloren oder werden sie einem falschen Recyclingverfahren zugeführt, so werden sie dem Materialkreislauf entzogen (Chancerel et al., 2009; Meskers et al., 2009).

In Abbildung 4 wird weiters beispielhaft die Gesamteffizienz der Recyclingkette bezogen auf die Ausbeute eines Metalls in einer bestimmten Produktgruppe dargestellt. Man erhält sie aus dem Produkt der jeweiligen Wirkungsgrade der Prozessschritte. Aus diesem Grund hat immer jener Vorgang die größte Auswirkung auf die tatsächliche Wertstoffausbeute, der den geringsten Wirkungsgrad aufweist.

Bedeutende Edelmetallverluste ergeben sich in der Recyclingkette vor allem bevor die Stoffe endgültig verarbeitet werden (beispielsweise durch eine ungenügende Sammlung von EKG). Hagelüken (2010b) schätzt daher, dass die Gesamteffizienz der Recyclingkette bei den Edelmetallen der meisten Konsumgüter unter 50 % beträgt. Dieser Prozentsatz ist verglichen mit den möglichen Rückgewinnungsraten von modernen metallurgischen Verfahren von über 95 % sehr gering.

Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit edelmetallhaltiger Produkte lassen sich folgende Einflussfaktoren feststellen:

- Der *Metallwert* des Materials hängt vom absoluten Edelmetallgehalt und den aktuellen Edelmetallpreisen ab. Er bestimmt die wirtschaftliche Attraktivität des Recyclings. Denn obwohl eine Edelmetallrückgewinnung aus EKG in vielen Fällen ökologisch sinnvoll ist, optimieren Recyclingunternehmen (wie auch Unternehmen anderer Branchen) ihre Abläufe innerhalb des gesetzlichen Rahmens primär unter ökonomischen Gesichtspunkten.
- Die *Materialzusammensetzung* des Produkts hat Einfluss auf die Wahl des technischen Rückgewinnungsverfahrens, die Rückgewinnungskosten und die erreichbaren technischen Rückgewinnungsraten.
- Das *Anwendungssegment* und die *Lebenszyklusstruktur* des Produkts werden beeinflusst von logistischen Fragen, der Produktlebenszeit, den über den Lebenszyklus involvierten AkteurlInnen, der Ausgestaltung der Recyclingkette sowie dem Geschäftsmodell. Hierbei lassen sich deutliche Unterschiede zwischen edelmetallhaltigen Konsumgütern (wie EKG für den privaten Gebrauch) und Industrieprodukten (wie Katalysatoren für die chemische Industrie) feststellen. Bei zahlreichen Industrieprodukten werden aufgrund der direkten oder geschlossenen Kreisläufe zwischen den HerstellerInnen, den AnwenderInnen und den RecyclingunternehmerInnen häufig hohe Rückgewinnungsraten erzielt. Hingegen sind beim indirekten oder offenen Kreislauf der Konsumgüter oft zahlreiche BesitzerInnen- und Standortwechsel sowie nicht nachvollziehbare Produktflüsse feststellbar. Dies wirkt sich negativ auf die Rückgewinnung von Edelmetallen aus.

(Deubzer, 2007; Hagelüken, 2010b)

4.1 Sammlung von EKG

Abbildung 4 verdeutlicht, dass EAG zunächst getrennt von anderen Abfallströmen gesammelt werden müssen, bevor sie weiter behandelt werden können. Ein Hauptziel der derzeit geltenden gesetzlichen Bestimmungen im Bereich EAG liegt daher auf der möglichst vollständigen Erfassung anfallender EAG. Dadurch soll verhindert werden, dass EAG aus dem Recyclingkreislauf entzogen werden. Prinzipiell unterscheidet sich die EAG-Sammlung aufgrund der eingesetzten Sammelsysteme und der Personen bzw. Organisationen, die für die Sammlung aus organisatorischer und/oder finanzieller Sicht verantwortlich sind. Folgende Sammelsysteme lassen sich feststellen:

- *Holsysteme*: EAG werden direkt von den EndnutzerInnen (Haushalte, Gewerbe) abgeholt. Gegebenenfalls werden dabei auch andere Abfälle erfasst. Ein Beispiel dafür ist das Projekt „Gelbe Tonne Plus“. Hierbei wird in der deutschen Stadt Leipzig und im Bundesland Berlin das etablierte Sammelsystem für Verpackungen auch zur Erfassung von stoffgleichen Nichtverpackungen und anderen geeigneten Stoffgruppen (wie EAG) genutzt (Langen et al., 2008).
- *Bringsysteme*: EAG werden von den EndverbraucherInnen zu Sammelzentren mit fixen Öffnungszeiten, Containern bei Sammelinseln oder temporären Sammelereignissen gebracht. Beispiele hierfür sind kommunale Sammelstellen oder die mobile Problemstoffsammlung (PROSA) in der österreichischen Bundeshauptstadt Wien, die es ermöglicht, die Sammelorte flexibel dem Bedarf anzupassen. Hier werden EAG im Zuge der PROSA mitgesammelt (Ratz, 2013).
- *EndnutzerInnen verschicken EAG per Post* an den/die SammlerIn. In Finnland können zum Beispiel Mobiltelefone in vorausbezahlten Briefumschlägen im nächsten Postkasten eingeworfen werden. Die Briefumschläge werden bei Bedarf den EndverbraucherInnen zugeschickt. Briefumschläge können auch direkt in der Verpackung des neu gekauften EEG beiliegen oder sind im Handel erhältlich (Tanskanen, 2012). In Österreich findet seit 2005 mit dem Sammelsystem „Wundertüte“ eine getrennte Erfassung von Mobiltelefonen statt. Jedes Jahr werden Briefumschläge an alle österreichischen Haushalte gesendet. Die gesammelten Mobiltelefone dienen als Spende für Sozialprojekte. Zahlreiche Medien und Kooperationspartner bewerben die Aktion. Zwischen 2005 und 2009 wurden mehr als 1,5 Millionen Mobiltelefone gesammelt (Beigl et al., 2012).
- *Kombination der verschiedenen Systeme*: In vielen Ländern erfolgt die EAG-Sammlung sowohl durch kommunale Hol- und Bringsysteme als auch durch Abgabemöglichkeiten im Handel. Dadurch sollen so viele Haushalte und Betriebe wie möglich erreicht werden.

(Mulder et al., 1999; Chancerel, 2010)

Folgende Stakeholder übernehmen Verantwortung für die Organisation und/oder die Finanzierung der EAG-Sammlung:

- Öffentliche Stellen wie Behörden, Kommunen bzw. deren Abfallwirtschaftsverbände
- Private Unternehmen wie HerstellerInnen und HändlerInnen von EEG bzw. EAG-Recycler. Neben diesen registrierten Unternehmen, die zu dem „formellen Sektor“ der Abfallwirtschaft gezählt werden, existiert der „informelle“ Sektor. Dabei erfolgt die EAG-Sammlung und Behandlung durch staatlich nicht registrierte Personen oder Unternehmen (Gmünder, 2007).
- Private nicht-kommerzielle Organisationen wie BürgerInneninitiativen oder Nichtregierungsorganisationen (Chancerel, 2010)

Mulder et al. (1999) untersuchten die Verantwortlichkeiten dieser AkteurInnen innerhalb der europäischen EAG-Sammlung und stellten dabei Erfolgsfaktoren für Sammelsysteme fest. Die Bewertung der Sammelsysteme sollte demnach aufgrund ökologischer und ökonomischer Kriterien basieren. Aus ökologischer Sicht ist es wichtig, einen Großteil der anfallenden EAG zu erfassen. Daher sollten jene Faktoren verstanden werden, die das Verhalten der BenutzerInnen des Sammelsystems am stärksten beeinflussen (Umweltbewusstsein, EAG-Größe sowie Bekanntheit und Bequemlichkeit des Sammelsystems). Weiters sollte das Sammelsystem möglichst kosteneffektiv umgesetzt werden, da mit steigenden Kosten die Akzeptanz der BenutzerInnen sinkt. Schließlich zeigt die Untersuchung, dass ein System mit geteilter Verantwortung den Erfolg steigert. Alle relevanten AkteurInnen sollen nicht nur einen Teil der Verantwortung übernehmen, sondern auch Prozesse positiv steuern. Wenn beispielsweise HerstellerInnen von EEG ihre Produkte umweltfreundlicher gestalten, können sowohl Recyclingkosten als auch Umweltgefährdungen minimiert werden. Andererseits haben sie wenig Einfluss auf eine haushaltsnahe Sammlung, die traditionell von Kommunen organisiert wird.

4.1.1 Praktizierte Sammelsysteme

Zahlreiche Länder haben unterschiedlich auf die steigende EAG-Problematik reagiert. Ongondo et al. (2010) und De Oliveira et al. (2012) analysierten die derzeitige Situation der praktizierten EAG-Sammelungs- und Behandlungsstrategien in verschiedenen Regionen und Ländern weltweit. Festgestellt wurde, dass (mit Ausnahme von Europa) die meisten vor allem weniger entwickelten Länder wenige bis keine gesetzlichen Regulierungen im EAG-Bereich aufweisen bzw., dass die Gesetzgebung und -vollziehung ineffizient verläuft. In Nordamerika und Australien mangelt es hauptsächlich am Umfang und der Durchsetzung der bestehenden Gesetze. Obwohl teilweise auf Ebene einzelner Bundesstaaten gesetzliche Regulierungen bestehen, fehlen oft bundeseinheitliche Gesetze. Kommunale Sammelsysteme und freiwillige Rücknahmeverpflichtungen sind die dominierenden Sammelschienen in diesen Ländern. Die größten Herausforderungen bei der Sammlung von EAG in Entwicklungsländern stellen der Aufbau funktionierender Infrastrukturen und die Durchsetzung effektiver gesetzlicher Bestimmungen dar. In den meisten Ländern Afrikas, Südamerikas und den ärmeren Regionen Asiens und Europas fehlen die nötigen formellen Kapazitäten, um alle anfallenden Abfallströme zu sammeln und zu behandeln. Hier stellt der informelle, nicht behördliche Sektor einen wichtigen Teil der Abfallwirtschaft dar. Sowohl in reichen als auch in armen Regionen der Welt ist die Deponierung von EAG ein großes Problem.

In Österreich erfolgt die Sammlung und Verwertung von EKG überwiegend (93 %) über Sammel- und Verwertungssysteme. Diese haben Verträge mit den SammelstellenbetreiberInnen, Regionalverbänden bzw. Ländern abgeschlossen. Allerdings kann durch diese privatrechtlichen Strukturen eine vollkommene Übernahme der an den Sammelstellen anfallenden EKG nicht von den Sammel- und Verwertungssystemen gewährleistet werden. Daher regelt die EAG-VO eine weitere Entsorgungsmöglichkeit für Sammelstellen im Rahmen der Abholkoordination der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle (EAK). Etwa 3 % der österreichischen EKG-Gesamtsammelmasse werden über dieses Angebot der EAK abgeholt. Rund 4 % der EKG-Gesamtsammelmasse wird von Altstoffsammelzentren der Kommunen

oder von sonstigen AbfallsammlerInnen in eigenem Auftrag direkt an eine/n BehandlerIn zur Verwertung übergeben (EAK, 2012).

Spitzbart et al. (2010) untersuchten Möglichkeiten zur Steigerung der getrennten Erfassung von EKG in der österreichischen Bundeshauptstadt Wien. Zunächst wurden Sammelsysteme in europäischen Regionen und Städten analysiert. Ausgehend von Ländern mit hohen Sammelmengen wurden zwei skandinavische Städte als Best-Practice-Beispiele ausgewählt - Göteborg (Schweden) und Stavanger (Norwegen) - und die EAG-Sammlung grundlegend charakterisiert. Im Folgenden dienen sie als Best-Practice-Beispiele für die Sammlung von EKG.

Wie in Österreich werden in den beiden skandinavischen Ländern kommunal gesammelte EKG vorwiegend über Altstoffsammelzentren erfasst. Zusätzlich angebotene Sammelschienen (zum Beispiel mobiles Abholservice im Rahmen der Sperrmüllsammlung, Abgabemöglichkeiten an Tankstellen und unbesetzten kleineren Sammelstellen) dienen hauptsächlich zur Erfassung mülltonnengängiger EKG. In Norwegen sorgt allerdings die gesetzlich festgelegte 1:0-Rücknahme (im Unterschied zur in der WEEE-RL geregelten 1:1 Rücknahme) durch den Handel dafür, dass auch bedeutende Mengen an EAG über den Handel erfasst werden. Es handelt sich hierbei um eine mengenunabhängige Verpflichtung, die nicht an einen Produktneukauf gebunden ist. Wie in Wien werden auch im Rahmen der PROSA EKG mitgesammelt. Des Weiteren hat sich die EKG-Sammlung mittels Sammelbehältern innerhalb von Wohnhausanlagen etabliert. In Göteborg erfolgt die Sammlung in Gitterboxen. In Stavanger werden EKG gemeinsam mit Problemstoffen in 30 l Sammelbehältern erfasst. Eine zusätzliche Sammelstrategie bilden Sammelbehälter auf stark frequentierten Plätzen (in Einkaufszentren oder großen Unternehmen). Hierbei sollen EKG und Problemstoffe im Rahmen von täglichen Wegen zum Einkaufen oder zur Arbeit gesammelt werden.

Tabelle 8 zeigt einen Vergleich der EKG-Sammelmengen der betrachteten Städte. Die aus der Tabelle erkennbaren höheren Sammelmengen in den skandinavischen Städten ergeben sich aufgrund eines höheren Erfassungsgrads (geringerer Anteil an EKG im Restmüll). In den skandinavischen Ländern herrscht ein höherer Lebensstandard als in Österreich. Daher können höhere Sammelpotentiale abgeleitet werden. Außerdem können die höheren Sammelmengen durch ein stärkeres Umweltbewusstsein der SkandinavierInnen erklärt werden. Schließlich werden aus Österreich bedeutende Mengen an EAG durch informelle SammlerInnen aus angrenzenden osteuropäischen Ländern transportiert (Obersteiner et al., 2010). Altstoffsammelzentren weisen auch in den skandinavischen Ländern die höchsten Sammelmengen auf. Die vorhin genannten zusätzlich eingerichteten Sammelschienen weisen vergleichsweise geringe Sammelmengen auf (Spitzbart et al., 2010).

	Wien	Göteborg (SE)	Stavangar (NO)
Einwohner	1,55 Mio.	0,49 Mio.	0,12 Mio.
Haushalte	772.000	230.000	52.000
EKG-Sammelschienen	- 19 Mistplätze (MP) - Pilotversuch Mobile PROSA - Insel- und Markt-PROSAS	- 5 Altstoffsammelzentren (ASZ) - Mobile PROSA - PROSAS auf Tankstellen - Gitterboxen in WHA - Pilotversuch Sammelbehälter in 4 Einkaufszentren	- Altstoffsammelzentren - Mobile PROSA (Kampagnen) - Sammelbox für Problemstoffe u. EKG in HH bzw. Müllräumen
EAG-Sammelmengen	5,5 kg/EW.a	11,5 kg/EW.a	16,6 kg/EW.a
EKG-Sammelmengen	1,1 kg/EW.a	3,6 kg/EW.a	4-5 kg/EW.a
Gefundene EKG in Restmüllanalysen	2,3 kg/EW.a (Restmüllanalysen 2003/04)	0,3 kg/EW.a (Zahlen 2007)	k.A.
Anteil Sammel-schienen am EKG-Sammelaufkommen	Handel: 0,3 kg/EW.a MP: 0,8 kg/EW.a PROSA: 0,1 kg/EW.a anhand aktueller Sammelmengen ABA-direkt: 0,1 kg/EW.a	Handel: k.A. ASZ: 3,5 kg/EW.a PROSA: <0,1 kg/EW.a Sammlaren: <0,1 kg/EW.a WHA: ca. 0,1 kg/EW.a	Handel: 3 – 3,5 kg/EW.a kommunale Sammel-schienen gesamt: 1,5 – 2 kg/EW.a

Tabelle 8: Städtevergleich hinsichtlich der EKG-Sammlung (Spitzbart et al., 2010)

4.1.2 Sammelverluste

Verschiedene Studien belegen, dass trotz der etablierten Sammelsysteme und der unterstützenden Gesetzgebung nur geringe Mengen der anfallenden EAG ordnungsgemäß gesammelt werden (Keller, 2006; Gmünder, 2007; Dimitrakakisa et al., 2008). Folgende Gründe lassen sich diesbezüglich feststellen:

- Lagerbildung nicht mehr genutzter Geräte bei den EndnutzerInnen: Diese Geräte bilden zumindest ein theoretisches Potential für die zukünftige ordnungsgemäße Sammlung und Behandlung.
- Entsorgung von tonnengängigen Geräten im Restmüll
- Export von EAG in Schwellen- und Entwicklungsländer (Afrika, Asien, Osteuropa): Einerseits handelt es sich dabei um legale Exporte von wiederverwendbaren Altgeräten (zum Beispiel Geräte der IKT). Nachdem sie im Empfängerland noch eine bestimmte Zeit genutzt werden, ist es aber sehr wahrscheinlich, dass sie aufgrund der mangelnden Infrastruktur und des fehlenden Umweltbewusstseins in den Importländern nicht ordnungsgemäß behandelt werden. Andererseits handelt es sich um halb- und illegale EAG-Exporte. Hierbei werden großteils nicht mehr funktionsfähige Geräte bewusst als „Reuse-Geräte“ deklariert, um die Exportbeschränkungen der Basler Konvention zu umgehen. Im Empfängerland werden die Geräte üblicherweise mit einfachsten Verfahren recycelt (Backyard-Recycling). Prelle (2009) sieht als Hauptursachen dieser illegalen Exporte aus der EU die in der derzeitigen WEEE-RL nicht vorhandene Abgrenzung zwischen Gebrauchsgütern und Altgeräten, Vollzugsdefizite, unterschiedliche Zuständigkeiten, mangelnde Kontrollen durch die nationalen Behörden sowie die fehlende mitgliedstaatenübergreifende Zusammenarbeit der Behörden.

(Hagelüken, 2006; Hagelüken, 2009)

Die EU hat im Rahmen der Novellierung der bestehenden WEEE-RL auf die illegale Verbringung von EAG reagiert. In Zukunft gelten hier stärkere Restriktionen. Beispielsweise muss der/die BesitzerIn Nachweise erbringen, dass es sich bei den exportierten Geräten um funktionsfähige Gebrauchtgeräte handelt. Des Weiteren fordert Anhang VI:

- eine Rechnungskopie und einen Vertrag über den Verkauf gebrauchter Ware,
- eine Erklärung der BesitzerInnen, dass es sich nicht um EAG handelt, sowie
- eine Verpackung, die angemessenen Schutz vor Beschädigung der Geräte gewährleistet (N.N., 2012).

Huisman et al. (2007) schätzten im Rahmen der Überarbeitung der WEEE-RL, dass circa 60 % der anfallenden EAG in Europa nicht ordnungsgemäß gesammelt und behandelt werden. Betrachtet man nur die Geräte der IKT und Unterhaltungselektronik mit ihren hohen Edelmetallgehalten, so wurden die Verluste auf mehr als 70 % des Potentials geschätzt. Der resultierende Metallverlust beträgt dabei mehr als 5 Milliarden US-Dollar und das nicht genutzte CO₂-Einsparungspotential 4 Millionen Tonnen. Puckett et al. (2005) schätzen, dass jeweils 45 % der nach Nigeria importierten EAG aus Europa und den USA stammen. Die restlichen 10 % stammen aus anderen Ländern wie Israel oder Japan. 75 % dieser Geräte sind in einem Zustand, der eine Reparatur und Wiederverwendung nicht mehr zulässt. Im Rahmen des Projektes „TRANSWASTE“ untersuchten Obersteiner et al. (2010) informelle Sammelaktivitäten in Zentraleuropa. Dabei werden hauptsächlich Sperrmüll, EAG und Textilien von nichtautorisierten Personen in mitteleuropäischen Ländern gesammelt und anschließend in ihre angrenzenden osteuropäischen Heimatstaaten exportiert. Dort werden die Gegenstände gegebenenfalls demontiert bzw. repariert und als Sekundärmaterialien oder Güter verkauft oder eingetauscht. Für Österreich wurde festgestellt, dass jährlich circa 80.000 Tonnen dieser Gegenstände (davon etwa 16 % EAG) informell gesammelt werden. 65.000 Tonnen gelangen dann über die österreichisch-ungarische Grenze. Diese Menge entspricht 15 % des formell gesammelten Abfalls (Sperrmüll, Metalle, EAG und Textilien) in Österreich.

Aufgrund ihrer geringen Größe, werden EKG oft haushaltsnah über den Restmüll entsorgt, obwohl spezielle Sammelsysteme existieren. Rotter et al. (2006) schätzten den EKG-Anteil im Restmüll deutscher Haushalte auf durchschnittlich 0,8 Gewichtsprozent. Dies entspricht einer EKG-Menge von 2,6 kg/EW.a. Huisman et al. (2012) untersuchten das EAG-Entsorgungsverhalten holländischer Haushalte. Quantifiziert wurden sowohl die insgesamt anfallenden EAG-Mengen als auch EAG-Ströme bei kommunalen Sammelstellen, Recycling- und Vertriebszentren sowie Second-hand- und Einzelhandelsläden. Tabelle 9 fasst ihre Ergebnisse zusammen. Etwa die Hälfte der anfallenden EKG wird ordnungsgemäß gesammelt und behandelt. Der Rest landet im Haushaltsabfall oder im informellen Sektor der Abfallwirtschaft.

Category of WEEE	Generation kg/capita/year	Separately collected	Residual waste	Uncertainty
Small household appliances , incl. small IT and consumer equipment products, handheld tools and toys	6.2	50%	26%	24%
IT equipment, laptops and desktops incl. accessories, phones, printers and game consoles	2.4	55%	22%	23%

Tabelle 9: Gegenüberstellung der EAG-Mengenströme in den Niederlanden (nach Huisman et al., 2012)

Im Gegensatz dazu, werden aufgrund ihrer Größe EAG wie Waschmaschinen und Kühlschränke seltener im Restmüll entsorgt oder auf Lager gehalten. Ausgediente Geräte werden häufig bei der Anlieferung von Neugeräten ausgetauscht und mitgenommen (Oguchi et al., 2011).

4.2 Aufbereitung

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, werden nach erfolgter Sammlung die Geräte vorbehandelt und für eine weitere Verwertung aufbereitet. Ziel des Aufbereitungsprozesses ist es, bestimmte Materialfraktionen durch Freilegungs- und Sortierverfahren für die richtigen Behandlungs- und Rückgewinnungsschienen bereitzustellen. Dabei unterteilt sich der Prozess der Erstbehandlung und Aufbereitung in folgende Schritte:

1. Sortierung (inklusive Eingangsverwiegung und Datenerfassung)
2. Selektive Demontage von wert- und schadstoffhaltigen Komponenten
3. Wertstoffanreicherung in den jeweiligen Fraktionen durch mechanische oder metallurgische Prozesse für die metallurgische Endverarbeitung

(Cui und Forssberg, 2003)

In der EU müssen speziell bei der Entfrachtung von Schadstoffen die im Anhang VII der WEEE-RL definierten Anforderungen der „selektiven Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen“ beachtet werden. Durch die ordnungsgemäße Verwertung bzw. Beseitigung von beispielsweise quecksilberhaltigen Schaltern oder Batterien soll eine Gefährdung von Mensch und Umwelt verhindert werden. Bei der Aufbereitung von EKG kommen sowohl manuelle, maschinelle als auch kombinierte Arbeitsschritte zum Einsatz. In Österreich und anderen europäischen Ländern haben sich bei der Behandlung (inklusive der Schadstoffentfrachtung) von EKG zwei Verfahren durchgesetzt. Einerseits werden bei der manuellen Demontage die Geräte geöffnet, um wert- und schadstoffreiche Komponenten zu entnehmen. Andererseits werden die Geräte zunächst maschinell aufgebrochen, um in einem nächsten Schritt wert- und schadstoffreiche Geräteteile manuell entlang von Förderbändern auszuklauben (Salhofer und Tesar, 2010).

Die manuelle Demontage zeichnet sich durch eine hohe Selektivität aus. Die Materialien und Bauteile der Geräte können sortenrein getrennt werden. Dabei entstehen kaum Verluste. Die Investitionskosten sind im Vergleich zur maschinellen Aufbereitung gering, da lediglich einfaches Werkzeug (Schraubenzieher, Zangen etc.) benötigt wird. Die Betriebskosten hängen stark von den Lohnkosten im jeweiligen Land des Demontagebetriebs ab. Je umfangreicher die Zerlegung, desto höhere Reinheitsgrade der Zielfractionen lassen sich erreichen, da Störstoffe weiter abgetrennt werden und die Qualität der bereitgestellten Materialfraktion steigt. Aufgrund der benötigten Zeit erhöhen sich aber gleichzeitig die Bearbeitungskosten. Die maschinelle Aufbereitung beinhaltet vor allem die vollautomatische Zerkleinerung der EAG (mittels Smasher, Hammermühlen oder Querstromzerspaner) mit anschließender Sortierung der Materialfraktionen (durch zum Beispiel Dichtesortierung, Magnetscheidung, Wirbelstromsortierung, sensorgestützter Sortierung). Im Allgemeinen zeichnet sich diese Art der Vorbehandlung durch höhere Investitionskosten im Vergleich zur manuellen Demontage aus, da teurere Maschinen angeschafft werden müssen. Weiters ist die erreichbare Selektivität deutlich geringer. Im Gegensatz dazu können höhere Durchsatzmengen erreicht werden, wodurch die Betriebskosten sinken. Bei kombinierten/semi-maschinellen Ansätzen werden die Geräte zunächst manuell zerlegt um wert- und schadstoffhaltige sowie wiederverwendbare Bauteile abzutrennen. Danach übernehmen Maschinen die Zerkleinerung (Gmünder, 2007).

In Österreich wurden 2006 14.614 t EKG gesammelt und 12.857 t EKG erstbehandelt. Abbildung 5 zeigt, dass etwas mehr als die Hälfte der behandelten Geräte manuell demontiert und schadstoffentfrachtet wurde. Ein geringer Anteil wurde durch sogenannte sozialökonomische Betriebe erstbehandelt. In diesen vom nationalen Arbeitsmarktservice unterstützten Betrieben werden hauptsächlich Langzeitarbeitslose angestellt und versucht, diese wieder langfristig erfolgreich in die Arbeitswelt zu integrieren. 47 % der gesamten Behandlungsmenge wurde zunächst mechanisch vorzerkleinert. Anschließend wurden die Schadstoffe manuell separiert.

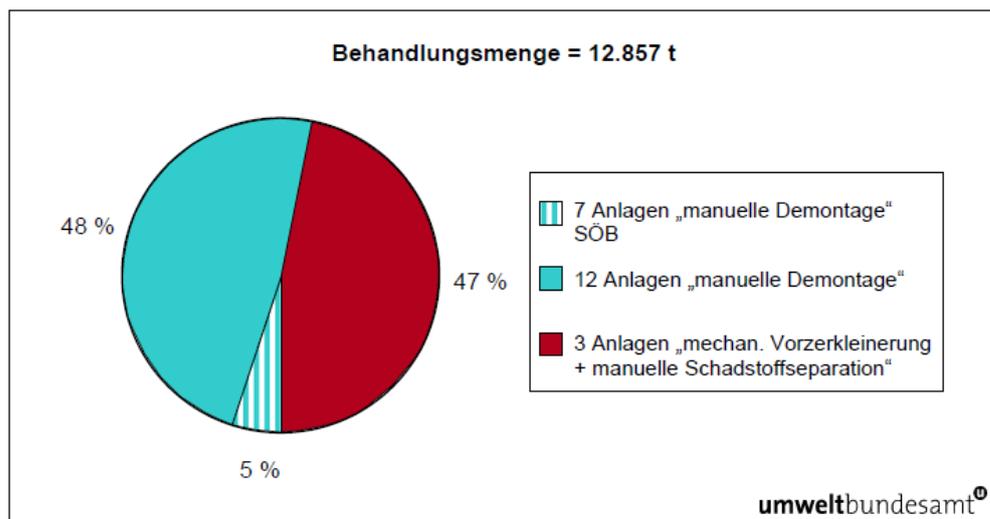


Abbildung 5: Aufteilung der KG-Behandlungsmenge auf Schadstoffentfrachtung mittels „manueller Demontage“ bzw. mittels „mechanischer Vorzerkleinerung + manueller Schadstoffseparation“, unterteilt in sozialökonomische (SÖB) und nicht sozialökonomische Betriebe (Tesar und Öhlinger, 2009)

Typischer Output der Erstbehandlung und Aufbereitung von EKG sind insbesondere eine magnetische Fraktion (zur weiteren Verarbeitung in der Stahlindustrie), eine Aluminiumfraktion (für Aluminiumhütten), eine Kupferfraktion (für Kupferhütten), Leiterplatten, Batterien und andere schadstoffhaltige Bauteile sowie manchmal sortenreine Kunststofffraktionen. In einer zusätzlich gewonnenen Reststofffraktion finden sich vermischte Kunststofffraktionen, Glas, Holz oder Gummi. Dieses oft als Shredderleichtfraktion bezeichnete Material wird entweder weiter aufbereitet, verbrannt oder abgelagert (Hischier et al. 2005; Hagelüken, 2006).

Hinsichtlich des optimalen Aufwands der Erstbehandlung und Aufarbeitung von EAG spielt das sogenannte Konzentrationsdilemma, welches in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist, eine wesentliche Rolle. Will man aus einer Inputfraktion ein spezielles Material (zum Beispiel Edelmetalle) rückgewinnen, dann sinkt die Ausbeute mit steigenden Anforderungen am Material. Um Mengenverluste zu reduzieren und einen akzeptablen Reinheitsgrad zu erzielen, muss ein Kompromiss zwischen Quantität und Qualität eingegangen werden (Hagelüken, 2006). Eine Unterscheidung zwischen technisch möglichen und ökonomisch sinnvollen Rückgewinnungsraten pro Wertstoff ist wichtig. Die technisch erreichbaren Recyclingraten liegen häufig deutlich höher als die von den Verwertungsunternehmen tatsächlich erzielten Wertstoffausbeuten. Unter den herrschenden Marktbedingungen ist es oft billiger, einzelne vermischte Fraktionen zu beseitigen (Verbrennung, Ablagerung) als sie weiter zu verwerten. Rückgewinnungsraten von Wertstoffen wie Metallen werden maßgeblich vom Verhältnis zwischen Kosten (wie Energie, Personal), der verfügbaren Technologie sowie den aktuellen Marktpreisen bestimmt (Deubzer, 2007).

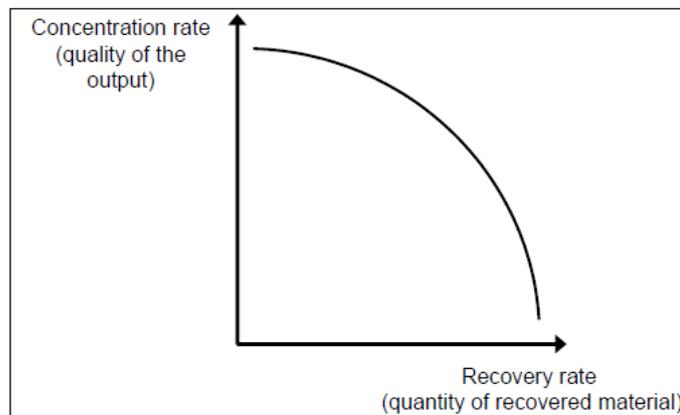


Abbildung 6: Das Konzentrationsdilemma bei der mechanischen Aufbereitung von EAG (Hagelüken, 2006 zit. nach Chancerel, 2010)

Da sich ein Großteil der in EAG enthaltenen Edelmetalle auf den Leiterplatten befindet und deren Verwertung ökonomisch besonders attraktiv ist, werden sie speziell bei der manuellen Aufbereitung gezielt aus den Geräten entfernt. Als wertstoffreiche Materialfraktion werden aus ihnen schließlich in geeigneten Einrichtungen Edelmetalle gezielt rückgewonnen. Edelmetallverluste treten dann auf, wenn Leiterplatten beispielsweise durch Shreddern ganzer Geräte in mengenmäßig größeren Fraktionen (Eisenmetalle, Kunststoffe) verteilt werden und zudem diese Materialströme in nicht auf die Edelmetallrückgewinnung ausgerichteten Einrichtungen behandelt werden. Zudem sorgen die Zerkleinerungsprozesse dafür,

dass Edelmetalle abplatzen und in den entstehenden Stäuben verloren gehen (Meskers et al., 2009). Chancerel et al. (2009) verglichen die Edelmetallkonzentration aus Leiterplatten, die an unterschiedlichen Aufbereitungsschritten dem gesamten Materialstrom entnommen wurden: Leiterplatten aus der manuellen Demontage am Beginn der Aufbereitung; manuell entnommene ca. 8 mm große Leiterplattenstücke nach einem ersten groben Shreddern der EKG sowie Leiterplattenstücke mit einer Größe unter 2,5 mm nach einem weiteren Shreddervorgang und anschließender maschineller Aussortierung. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle 10 dargestellt.

<i>Concentration of metal</i>	<i>Silver (g/t)</i>	<i>Gold (g/t)</i>	<i>Palladium (g/t)</i>
Unshredded printed circuit boards	669	135	50
Preshredded printed circuit boards (<8 mm)	562	126	48
Shredded printed circuit boards (<2.5 mm)	481	48	18

Tabelle 10: Gemessene Edelmetallkonzentrationen in den Outputs "unshredded PCB", "preshredded PCB" und "shredded PCB" (Chancerel et al., 2009)

Je stärker die Leiterplatten durch Shreddern zerkleinert werden, desto stärker sinkt die Edelmetallkonzentration (Silber, Gold und Palladium) in der erhaltenen Shredderfraktion. Der Edelmetallgehalt der manuell entnommenen Leiterplatten ist am höchsten und liegt um etwa 7 % über dem Edelmetallgehalt der vorgeshredderten Leiterplatten. Dieser Unterschied ist noch deutlicher beim Vergleich der vorzerkleinerten Leiterplatten mit der endgültigen Shredderfraktion. Hier beträgt die Differenz der Edelmetallkonzentration über 60 %. Es scheint, dass durch die Zerkleinerung der Leiterplatten die Edelmetalle in den mengenmäßig relevanteren Outputfraktionen verteilt werden und daher der Edelmetallgehalt sinkt (Chancerel et al., 2009). Ein zentrales Problem bei der mechanischen Zerkleinerung und Sortierung ist, dass keine vollkommen reinen Outputfraktionen garantiert werden können. Aufgrund der vielfältigen Materialzusammensetzung von EAG schafft die mechanische Zerkleinerung keine vollständige Auftrennung der Materialverbunde. Dies führt bei den anschließenden Sortierprozessen zu Materialverlusten in anderen Fraktionen (Manhart, 2010).

Tabelle 11 zeigt Ergebnisse der Untersuchung von Chancerel et al. (2008) über die Massenverteilung von Eisen, Kupfer und der Edelmetalle Silber, Gold und Palladium in den Outputfraktionen nach einer mechanischen EAG-Aufbereitung. Insgesamt wurden 27 Tonnen an EAG (hauptsächlich IKT-Geräte und Geräte der Unterhaltungselektronik) aufbereitet. Eine Tonne des gemischten EAG-Inputs enthielt zum Beispiel etwa 400 kg Eisen. 71 % davon konnte nach der Aufbereitungsprozesse auch tatsächlich in der Outputfraktion „Eisenmetalle“ nachgewiesen werden. Dieser Anteil kann dann in einem Stahlwerk gezielt rückgewonnen werden. Andererseits zeigen die Ergebnisse, dass nur 24 % des Goldes in der edelmetallreichen Outputfraktion gefunden wurde. Für Silber beträgt der Anteil nur 11 %. Ein Großteil der Edelmetalle wurde in den mengenmäßig bedeutsameren Eisen- und Kunststofffraktionen verteilt. Daher liegen die erzielbaren Rückgewinnungsraten bei den Edelmetallen deutlich geringer als bei Eisen oder Kupfer. Obwohl die Eisenmetallfraktion aufgrund ihrer großen Masse einen geringen Edelmetallgehalt aufweist, ist sie die wichtigste Outputfraktion für diese Edelmetalle. Aus diesem Grund müssen auch schon geringe Edelmetallkonzentrationen in den

mengenrelevanten Fraktionen hinsichtlich ihrer rohstoffwirtschaftlichen Bedeutung beachtet werden.

Metal						
	Iron	Copper	Silver	Gold	Palladium	
Metal content per ton WEEE	401,92 kg	43,51 kg	313,32 g	22,24 g	7,16 g	
Mass distribution over the output fractions						
Output	Aluminium	0%	2%	19%	2%	1%
	Ferrous metals	71%	6%	35%	40%	23%
	Metal composites	18%	40%	1%	1%	2%
	Other material	4%	8%	6%	4%	17%
	Plastics	0%	24%	29%	29%	33%
	Precious-metals rich material	6%	20%	11%	24%	24%
	Sum	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 11: Verteilung von Eisen, Kupfer, Silber, Gold und Palladium in den Outputfraktionen nach der EKG-Aufbereitung (nach Chancerel et al., 2008)

Lee et al. (2012) empfehlen ebenfalls eine gezielte Behandlung manuell entnommener Leiterplatten aus EAG. Durch die mechanische Zerkleinerung der Leiterplatten ist es schwierig und teuer die in Spuren enthaltenen Metalle einzeln rückzugewinnen. Zusätzlich können durch die manuelle Entnahme der Leiterplatten die darauf befindlichen elektronischen Bauelemente demontiert und sogar wiederverwendet werden. In ihrer Studie zeigen die AutorInnen, wie von manuell entnommenen Leiterplatten die elektronischen Komponenten gezielt in mehreren Durchläufen durch maschinelles Abschleifen entfernt werden können. Sie verwenden dazu eine selbstkonstruierte Anlage. Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der behandelten Leiterplatten.

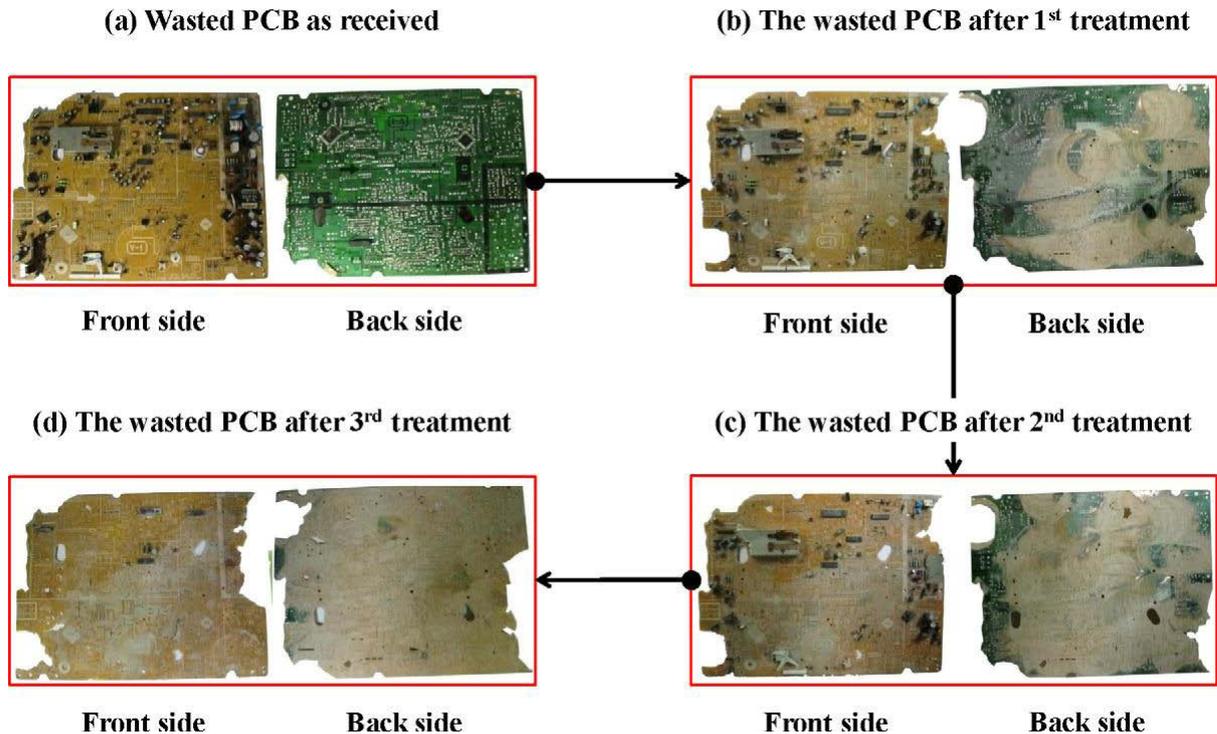


Abbildung 7: Darstellung von gezielt behandelten Leiterplatten durch maschinelles Abschleifen der elektronischen Bauelemente (Lee et al., 2012)

Um Edelmetallverluste zu vermeiden empfiehlt es sich daher, wertvolle Gerätekomponenten (wie Leiterplatten) aus EAG manuell zu entnehmen, bevor sie im Shredder in anderen Fraktionen verteilt werden. Diese Empfehlung findet man auch in anderen Untersuchungen (wie Goosey und Kellner, 2002; Meskers et al., 2009; Buchert et al., 2012; Oguchi et al., 2012; Wang et al., 2012).

4.3 Rückgewinnung von Edelmetallen

Zur Rückgewinnung von Edelmetallen aus EAG werden derzeit vor allem pyro- und hydrometallurgische Technologien angewendet. Moderne Einrichtungen nutzen Kombinationen dieser Verfahren um auch andere (zum Beispiel unedle) Metalle rückzugewinnen. Biometallurgische Prozesse stecken noch in der Entwicklungsphase (Yu et al., 2009).

Um das richtige Verfahren für die zu behandelnden Materialfraktionen zu wählen sind deren Zusammensetzung, die Matrixeigenschaften, die Konzentration an Edel- und sonstigen Metallen sowie etwaige organische Verunreinigungen zu beachten. Weiters spielen die ökonomischen Rahmenbedingungen und technischen Möglichkeiten des Unternehmens eine wesentliche Rolle. Sekundärmaterialien wie beispielsweise Leiterplatten zeichnen sich häufig durch ein weites Materialspektrum mit vielfältigen Eigenschaften aus. Entscheidend für die Behandlung von EAG sind aber vor allem der Edelmetallgehalt sowie die herrschenden Marktpreise. Weltweit existieren nur wenige Recyclingunternehmen, die die benötigten komplexen Verfahren zur Rückgewinnung der gewünschten Stoffe anwenden können. Beispiele hierfür sind die Unternehmen Aurubis (Deutschland), Boliden (Schweden), Dowa (Japan), Umicore (Belgien) und X-Strata (Kanada). Da die Kosten für den Transport

von edelmetallhaltiger Sekundärmaterialien in der Regel nur einen Bruchteil der Gesamtkosten des Rückgewinnungsprozesses ausmachen, ist es sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht vorteilhaft, diese zu den weltweit besten Einrichtungen zu transportieren. Der Transport zu bzw. das Recycling in speziell darauf ausgerichteten Scheideanstalten verursacht geringere Umweltbelastungen als die durch eine mangelhafte Aufbereitung in näher gelegenen Einrichtungen resultierenden Emissionen und Edelmetallverluste (Hagelüken, 2010b). Buchert et al. (2012) stellen fest, dass vor allem in der Endverarbeitung in Europa durch modernste Rückgewinnungsverfahren hohe Edelmetallausbeuten erzielt werden können. Die benötigten Anlagenkapazitäten existieren bereits jetzt und werden in Zukunft weiter ausgebaut. Schwachstellen sehen die AutorInnen hauptsächlich am Beginn der Recyclingkette bei der Sammlung und Aufbereitung der Geräte.

4.3.1 Pyrometallurgische Rückgewinnung

Bei der pyrometallurgischen Rückgewinnung von Metallen aus EKG werden die Leiterplatten oder Bauteile davon (Schaltkreise, Kontakte, Prozessoren) sowie ganze Geräte (vor allem Mobiltelefone nach Entnahme der Akkumulatoren) direkt in Kupfer- oder Edelmetallhütten verarbeitet. Die Fraktionen werden zusammen mit anderen edelmetallhaltigen Fraktionen wie beispielsweise Katalysatoren oder Primärkonzentraten vermengt und in einem Hochofen oder Metallbad eingeschmolzen. Zur Extraktion der Edelmetalle dienen spezielle Sammlermetalle (zum Beispiel das im Primärmaterial vorhandene Kupfer). Die abgetrennte Schlacke setzt sich aus keramischen Stoffen und Metalloxiden zusammen und wird oft in einem zusätzlichen Hochofenprozess nachbehandelt. Ziel ist es, dadurch weitere Metalle aus der Schlacke rückzugewinnen. Um die mit Edelmetallen angereicherten Sammlermetalle weiterzuverarbeiten werden verschiedene Kombinationen von elektrochemischen, pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Prozessen durchgeführt. Bei den pyrometallurgischen Verfahren entsteht eine Vielzahl von gefährlichen Stoffen im Abgas (Stäube, Dioxine, Furane, Halogene). Um ihre Entstehung zu verringern, sie abzutrennen bzw. zu zerstören werden eine optimale Prozessführung sowie eine leistungsfähige Rauchgasreinigung mit Filtern, Wäschern und Katalysatoren benötigt (Hagelüken, 2010b; Buchert et al., 2012).

Eine detaillierte Beschreibung von verschiedenen in der Praxis angewendeten pyrometallurgischen Verfahren findet sich in Cui und Zhang (2008). Beispielsweise hat sich die Firma Umicore am Standort Hoboken in Belgien auf die Edelmetallrückgewinnung aus EAG spezialisiert. Das dortige Werk ist in zwei operationale Linien unterteilt: Precious Metals Operations und Base Metal Operations. Darin können 17 verschiedene Metalle inklusive 7 Edelmetalle recycelt werden. In der Kupferhütte im schwedischen Rönnskär des Unternehmens Boliden wurde das sogenannte Kaldo-Verfahren entwickelt. Es verzichtet auf die Entfernung von in EAG enthaltenen Kunststoffen bei der Aufbereitung. Im Schmelzprozess dient der hohe Brennwert der Kunststoffe zur Reduktion der benötigten Energie. Zunächst wird ein Kupfergemisch hergestellt, aus dem in einem weiteren Verfahrensschritt Kupfer, Gold, Silber, Palladium, Nickel, Selen und Zink extrahiert werden. Die in der Rauchgasreinigung abgeschiedenen Stäube enthalten Blei, Antimon, Cadmium sowie Indium und werden in anderen Einrichtungen weiterbehandelt (Buchert et al., 2012). Im Rahmen des Multi-Metall-Recyclings der deutschen Firma Aurubis werden

aus schadstoffentfrachteten EAG und ihren Bauteilen und Komponenten (wie Leiterplatten) Edelmetalle rückgewonnen. Zur pyrometallurgischen Verarbeitung wird das Kayser-Recycling-System angewendet. Dabei erfolgt in einem Badschmelzofen zunächst das Einschmelzen und Raffinieren. Anschließend werden in einer ergänzenden Ofenanlage Kupfer, Nickel, Zinn, Blei und die in den Rohstoffen enthaltenen Edelmetalle in einer Legierung mit rund 95 % Kupferinhalt angereichert. Am Ende der pyrometallurgischen Verarbeitung wird die Kupferlegierung zu Kupferanoden vergossen. Die letzte Reinigungsstufe bildet die Kupferraffinationselektrolyse. Hier werden Begleitmetalle (wie Gold und Silber) im Anodenschlamm angereichert. Schließlich werden die Anodenschlämme in der Edelmetallgewinnungsanlage verarbeitet (Coesfeld und Steenbock, 2013).

4.3.2 Hydrometallurgische Rückgewinnung

Bei der hydrometallurgischen Rückgewinnung von Edelmetallen aus EAG wird das aufbereitete Material mittels starker Reagenzien wie Königswasser (Salzsäure und Salpetersäure) oder Zyanide ausgelaugt. Die entstandenen Lösungen durchlaufen anschließend eine Reihe von Abtrennungs- und Reinigungsverfahren. Dabei werden Verunreinigungen ausgefällt und Lösungsmittel extrahiert. Weiters kommen Adsorptionsvorgänge sowie Ionenaustauscher zur Anwendung um die gewünschten Edelmetalle zu isolieren und anzureichern. Die Wertstoffe werden schließlich aus den Lösungen mittels Elektroraffination, chemischer Reduktion oder Kristallisation rückgewonnen (Cui und Roven, 2011).

Pyro- und hydrometallurgische Verfahren werden in der Praxis häufig kombiniert eingesetzt und können vielfach als komplementär betrachtet werden. Beispielsweise wird in integrierten Edelmetallhütten das Material zunächst pyrometallurgisch angereichert. Danach folgen unterschiedlichste hydrometallurgische Verfahren als weitere Behandlungsschritte. Hagelüken (2010b) sieht die vorrangigen Anwendungsbereiche für hydrometallurgische Verfahren vor allem bei Materialien mit einem hohen Edelmetallgehalt, wie Edelmetalllegierungen und vorkonzentrierte Fraktionen. Weiters eignen sie sich für das Ablösen von Edelmetallen von beschichteten Oberflächen. Besonders einfache (monometallische) Materialien ohne komplexen Verbund mit guter Löslichkeit der Edelmetalle sollten hydrometallurgisch behandelt werden. Je heterogener und komplexer die Materialzusammensetzung und je stärker der Verbund der Edelmetalle mit anderen Stoffen, desto sinnvoller wird der Einsatz von pyrometallurgischen Verfahren. Sie schaffen es, die Edelmetalle aus dem komplexen Materialverbund freizulegen und für eine nachfolgende Bearbeitung im Sammlermetall, im Flugstaub oder in der Schlacke zu konzentrieren.

4.3.3 Biometallurgische Rückgewinnung

In den letzten 20 Jahren ließ sich, neben den etablierten pyro- und hydrometallurgischen Verfahren, ein besonders steigendes Interesse an biometallurgischen Verfahren feststellen. Die beiden bedeutendsten biometallurgischen Methoden sind die Biolaugung und die Biosorption. Bei der Biolaugung nutzt man bestimmte Bakterien und Pilze, die während ihrer Wachstumsphase organische und anorganische Säuren bilden, um Metalle zu separieren. Auf diese Weise können beispielsweise Aluminium, Blei, Kupfer und Zinn von Leiterplatten separiert werden. Grundlage des Prozesses der Biosorption ist

die Tatsache, dass zahlreiche Mikroorganismen, wie beispielsweise Algen, Bakterien oder (Hefe-) Pilze verschiedene Metallarten zur Unterstützung ihres Zell- und Baustoffwechsels benötigen. Dabei können sie Edel- und Schwermetalle in ihrem Organismus akkumulieren (entweder an der Zelloberfläche oder durch direkten Einbau in die Zelle). In weiteren Verfahrensschritten können die Metalle aus den Mikroorganismen rückgewonnen werden. Derzeit konzentrieren sich wissenschaftliche Untersuchungen vor allem auf die biometallurgische Extraktion von Edelmetallen (hauptsächlich Gold, Kupfer und Silber) aus Erzen. Dabei werden mittels bakterieller Laugung störende unlösliche Metallsulfide aus edelmetallhaltigen Erzen in lösliche Metallsulfate übergeführt und damit für weitere chemische Behandlungsschritte vorbereitet. Im Vergleich zu pyro- und hydrometallurgischen Verfahren bietet die Biometallurgie einige Vorteile. Obwohl die biometallurgische Rückgewinnung von Metallen weiterer Forschung und Verbesserung bedarf, um ökonomisch attraktiver zu werden, sind die Betriebskosten im Vergleich zu konventionellen Verfahren niedrig. Weiters zeichnet sich der gesamte Recyclingprozess durch eine geringere Umweltbelastung aus, da die anfallenden Schlämme und Abwässer weniger gefährlich sind (Morin et al., 2006; Schippers, 2009).

Für die biometallurgische Edelmetallrückgewinnung aus EAG und im Speziellen aus Leiterplatten gibt es noch wenige wissenschaftliche Studien (zum Beispiel Krebs et al., 1997; Cui und Zhang, 2008).

4.3.4 Vorteile der Edelmetallrückgewinnung aus EKG

Im Vergleich zum Gehalt anderer Elemente in der Erdkruste, ist der durchschnittliche Edelmetallgehalt häufig gering. Insbesondere in den Leiterplatten von EKG ist der Edelmetallgehalt deutlich höher als der Edelmetallgehalt von abgebauten Erzen, der heutzutage häufig unter 10 g/t liegt (Abbildung 2). Daher gewinnt die Rückgewinnung von Edelmetallen aus EAG immer stärker an Bedeutung. Die Primärproduktion (Bergbau, Verarbeitung der Mineralien, Metallerzeugung) ist aber nach wie vor wichtig für die Bereitstellung von Edelmetallen für EEG (Hagelüken, 2010a). Hagelüken und Meskers (2008) schätzen, dass 2006 circa 12 % der Weltprimärproduktion von Gold, 30 % der Weltprimärproduktion von Silber und 15 % der Weltprimärproduktion von Palladium für die Herstellung von EEG benötigt wurden. Bei den Elementen Indium und Ruthenium wurde fast die gesamte Fördermenge für die Produktion von EEG verwendet. Da für viele Metalle, die in EEG gebraucht werden, keine eigenen Minen existieren, werden sie oft als Nebenprodukte beim Abbau von beispielsweise Kupfer, Nickel, Zink oder Blei gewonnen. Typische Nebenprodukte sind Selen, Indium oder Bismut. Bei der Förderung von Platin und Palladium besteht auch die Möglichkeit Rhodium und Ruthenium zu gewinnen. Die Primärproduktion von Edelmetallen verursacht allerdings häufig erhebliche negative Umweltauswirkungen. Zur Erschließung von neuen Vorkommen werden große Landmengen verbraucht. Der Abbau und die Metallerzeugung verlangen einen großen Wasser- und Energieeinsatz und bewirken damit hohe Treibhausgasemissionen. Schätzungsweise werden pro gewonnener Tonne Palladium 9.380 t CO₂ bzw. pro Tonne Platin 13.954 t CO₂ emittiert. Der jährliche CO₂-Ausstoß für die Produktion aller Metalle, die in EEG benötigt werden, beträgt etwa 23,4 Millionen t. Diese Menge entspricht 1/1.000 der weltweiten CO₂-Emissionen (Hagelüken und Buchert, 2008). Wang und Gaustad (2012)

verdeutlichen in ihrer Untersuchung, dass die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Leiterplatten im Vergleich zur Primärproduktion mit deutlichen Energieeinsparungen verbunden ist. Abbildung 8 zeigt Energieeinsparungspotentiale pro Element beim Recycling von einer Tonne Leiterplatten. Gold weist mit Abstand das höchste Einsparungspotential auf. Gemeinsam mit den Edelmetallen Palladium, Platin und Silber beträgt die mögliche Energieeinsparung mehr als 80 %.

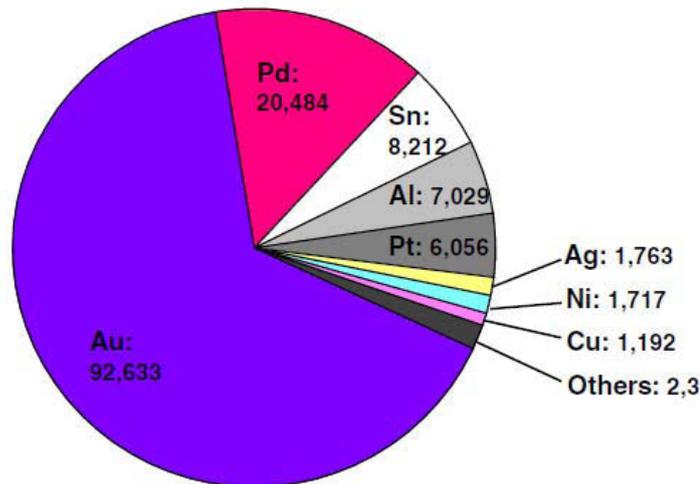


Abbildung 8: Energieeinsparungspotentiale für Metalle beim Recycling von 1 Tonne Leiterplatten [ΔMJ/t Leiterplatten] (nach Wang und Gaustad, 2012)

Des Weiteren konzentriert sich die weltweite Primärgewinnung von Edelmetallen auf wenige Regionen und Minengesellschaften. Südafrika und Russland zählen zu den wichtigsten Förderländern von Gold und Platinmetallen. Etwa 90 % der weltweiten Minenproduktion der Platinmetalle stammt aus diesen Ländern (Klapwijk, 2012a). Hinsichtlich der Silberproduktion sind die wichtigsten Förderländer Australien, China, Mexiko, Peru sowie die U.S.A. (Klapwijk, 2012b).

4.3.5 Informelle Behandlung

Wie in Kapitel 4.1.2 dargestellt, weist die reale Kreislaufwirtschaft große Schwachstellen auf. Neben den geringen Sammelmengen stellt die informelle Behandlung von EAG vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern eine große Herausforderung dar. Obersteiner et al. (2010) fassen dabei folgende Probleme zusammen:

- *Ökologische Belastungen* ergeben sich durch die unsachgemäße Behandlung und Entsorgung von EAG an nicht geeigneten Orten. Durch den Export von EAG erhöht sich zudem in den Zielländern die Abfallmenge, die behandelt werden muss, wodurch sich dieses Problem weiter verschärft.
- *Soziale Probleme*: Der informelle Sektor der Abfallsammlung und -behandlung besteht hauptsächlich aus Einzelpersonen oder kleinen Gruppen (auch Familien), die über keine soziale Absicherungen verfügen (Arbeitsverträge, Versicherungen etc.). Des Weiteren sind sie mit gesundheitlichen Gefahren durch die unsachgemäße Behandlung der in EAG enthaltenen Problemstoffe konfrontiert.

- *Ökonomische Probleme* ergeben sich für die formellen Abfallwirtschaftsstrukturen in den Exportländern durch den Verlust der wiederverwertbaren Abfälle. Außerdem gehen durch unsachgemäße Verwertungsverfahren in den Importländern Ressourcen unwiederbringlich verloren.

Huisman (2004) und Deubzer (2007) konnten bei Verwertungsverfahren, die dem Stand der Technik entsprechen, Edelmetallrückgewinnungsraten von über 90 % feststellen. Rochat et al. (2007) untersuchten wiederum Verfahren und Metallausbeuten von Backyard-Recyclingbetrieben in Bangalore (Indien). Die Ergebnisse zeigen, dass nur etwa ein Viertel des in den recycelten Leiterplatten enthaltenen Goldes rückgewonnen werden kann. Silber, Palladium und Kupfer gehen fast vollständig verloren. Die unsachgemäßen Behandlungsverfahren führen zu negativen Gesundheits- und Umweltauswirkungen. Um Metalle aufzukonzentrieren werden die EAG verbrannt (Abbildung 9). Dadurch werden große Mengen an Dioxinen freigesetzt. Chemikalienrückstände aus Laugungsprozessen werden unbehandelt entsorgt. Quecksilber, welches zur Amalgamierung von Gold eingesetzt wird, verdunstet über dem offenen Feuer.



Abbildung 9: Informelle Behandlung von EAG in Indien, Verbrennung von Kabeln (EMPA, 2009)

Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 fassen sechs unterschiedliche Recyclingszenarien eines PCs zusammen und vergleichen Goldausbeuten und -verluste bei formellen und informellen Behandlungsverfahren (zit. nach Wang et al., 2012). Die ersten beiden Szenarien stellen Aufbereitungsverfahren in West-Europa dar. Durch gezielten manuellen Ausbau der Hauptplatinen und Kontakte werden Goldausbeuten von 80 % erreicht. Die Demontage von Netzanschlüssen und Festplatten erhöht die Goldausbeute um weitere 17 % (Szenario 1). Im Gegensatz dazu führt die mechanische Aufbereitung zu Goldverlusten im Staub und in der Eisenmetallfraktion in Höhe von 30 % (Szenario 2). Im 3. Szenario wird ein Shredderverfahren gezeigt, das speziell auf die Rückgewinnung von edelmetallreichen Fraktionen bei IKT-Geräten ausgerichtet ist. Szenario 4 fasst nochmal die Ergebnisse von Chancerel et al. (2009) zusammen (Kapitel 4.2). Der Vergleich zwischen Szenario 3 und Szenario 4 verdeutlicht, dass unterschiedliche technische Einstellungen in der mechanischen Aufbereitung Goldverluste zwischen

11 % und 74 % bedeuten. Daher sollten die technischen Einstellungen der Verwertungsverfahren immer gezielt auf die zu behandelnden Abfallarten ausgerichtet werden. Hinsichtlich der Endverarbeitung (Szenario 3, 5 und 6) erreichte eine integrierte Metallhütte Goldausbeuten von über 90 %. In einer Kupferhütte und bei der informellen Laugung lagen die Verluste deutlich höher. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, wie unterschiedlich sich die EAG-Behandlung gestaltet. Zur Maximierung der Rückgewinnung von Gold sollten eine gezielte manuelle Demontage der wertstoffreichen Komponenten und Verwertung in modernen integrierten Metallhütten kombiniert werden. Aufgrund der hohen Lohnkosten in Industrieländern ist eine manuelle Demontage oft sehr teuer. In Entwicklungsländern fehlt häufig das nötige Kapital und Know-How für die Endverarbeitung. Szenario 6 zeigt, dass durch die örtliche Trennung von Aufbereitung (manuelle Demontage in Entwicklungsländern) und Endverarbeitung (integrierte Metallhütten in Industrieländern) gute technische, ökonomische und ökologische Ergebnisse möglich sind (Wang et al., 2012).



Abbildung 10: Szenario 1 (links): Manuelle Demontage von PCs in Deutschland (Meskers und Hagelüken, 2009); Szenario 2 (rechts): Mechanische Aufbereitung von PCs in Deutschland (Meskers und Hagelüken, 2009)

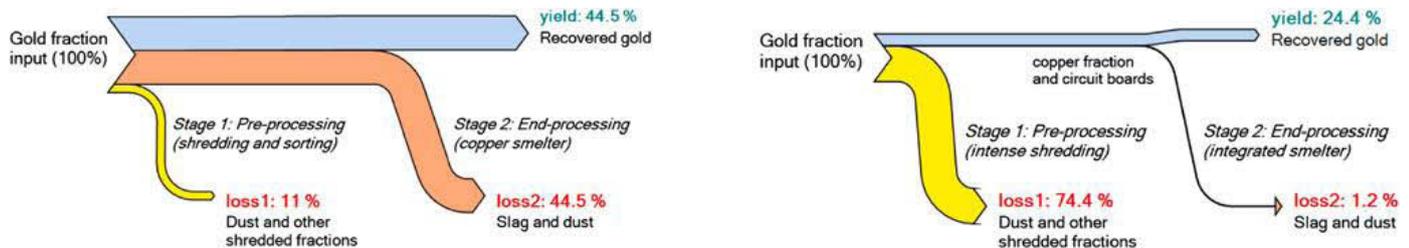


Abbildung 11: Szenario 3 (links): Optimiertes Schredderverfahren für kleine IKT-Geräte, Kupferhütte (Huisman et al., 2007); Szenario 4 (rechts): Shreddern eines gemischten Inputs an IKT-Geräten, integrierte Metallhütte (Chancerel et al., 2009)

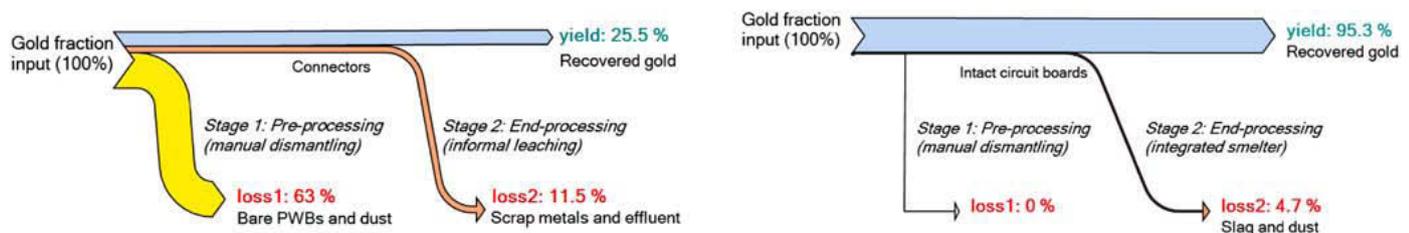


Abbildung 12: Szenario 5 (links): Informelle Behandlung von Leiterplatten in Indien (Keller, 2006; Rochat et al., 2007); Szenario 6 (rechts): Demontageversuch von PCs in China (Gmünder, 2007)

5. Sammelversuch zur Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte

Der folgende Abschnitt schildert die Ziele, Vorgehensweise und Ergebnisse des durchgeführten Sammelversuchs zur getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf fünf Recyclinghöfen im österreichischen Bundesland Tirol. Zusätzlich wurde auf Basis von Daten zur Verteilung der gesammelten Kleingerätearten in Wien (KERP, 2011) eine Analyse hinsichtlich der in EKG enthaltenen Wertstoffe Gold, Silber und Palladium durchgeführt.

5.1 Ziel des Sammelversuchs

Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, treten Edelmetallverluste bei einer Behandlung von EKG dann auf, wenn wertstoffreiche Komponenten (Leiterplatten) durch zum Beispiel Shreddern ganzer Geräte in mengenmäßig dominanteren Fraktionen dissipativ verteilt werden. Zudem ist bei einem gemischten Input an EKG (Geräte mit hohem und geringem Wertstoffanteil) die Behandlung zu wenig auf die Rückgewinnung von hochwertigen Komponenten ausgerichtet. Wertvolle Ressourcen wie Edelmetalle werden daher nur in geringem Umfang zurückgewonnen. Um wertstoffreiche EKG gezielter zu behandeln, können sie bereits bei den Sammelstellen (Recyclinghöfen-RH) getrennt erfasst oder bei den BehandlerInnen vorsortiert werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Umsetzbarkeit einer getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf RH in Österreich zu testen. Dazu wurde in Kooperation mit dem Abfallverband Tirol Mitte (ATM) ein wissenschaftlicher Sammelversuch auf fünf Tiroler RH durchgeführt.

5.2 Versuchsaufbau und Ergebnisse

5.2.1 Vorstellung der teilnehmenden Recyclinghöfe

Für die Durchführung des Sammelversuchs zur Erfassung der EKG mit hohem Wertstoffanteil wurden vom ATM (Ing. Alexander Würtenberger) fünf RH im österreichischen Bundesland Tirol vorgeschlagen. Es handelte sich um den RH Kufstein, den RH Kramsach/Brixlegg, den RH Mayrhofen/Brandberg, das Abfallwirtschaftszentrum (AWZ) Zillertal Mitte in Kaltenbach und den Wertstoffhof Thaur. Grundinformationen über die RH zeigt Tabelle 12.

	Kufstein	Kramsach / Brixlegg	Mayrthofen / Brandberg	AWZ Zillertal Mitte / Kaltenbach	Thaur
Adresse	Enddach 43, 6330 Kufstein	Amerling 141, 6233 Kramsach	Laubichl 120, 6290 Mayrthofen	Gewerbepark, 6272 Kaltenbach	Dorfplatz 4, 6065 Thaur
Baujahr	2011	2009	1995	2005	1998
Größe (Grundfläche in m²)	1.300	1.500	2.454	1.200	2.000
Angeschlossene Gemeinden (EinwohnerInnen)	Kufstein (17.550), Schwoich (2.314) Σ 19.864	Kramsach (4.609), Brixlegg (2.809) Σ 7.418	Mayrthofen (3.862), Brandberg (349), Schwendau (1.608), Hippach (1.570), Ramsau (1.570), Fraktion Ginzling- Dornauberg (390) Σ 9.155	Aschau im Zillertal (1.732), Kaltenbach (1.229), Stumm im Zillertal (1.807), Stummerberg (841) Σ 5.609	Thaur (3.790) Σ 3.790
Anzahl MitarbeiterInnen (Vollzeitäquivalente)	2	3	1,5	0,5	0,25

Tabelle 12: Grundinformationen über die am Sammelversuch teilnehmenden RH

5.2.2 Erstellung der Liste wertstoffreicher Elektrokleingeräte

In einem ersten Schritt wurde mittels Literaturrecherche eine Liste wertstoffreicher EKG erstellt (ausgehend von den Überlegungen, die bereits in Kapitel 3 angestellt wurden). Aufgrund ihres hohen Wertstoffgehalts und der expliziten Betrachtung in einer eigenen Gerätekategorie im Zuge der Novellierung der WEEE-RL wurde schließlich folgende Liste angelegt:

Liste wertstoffreicher Kleingeräte (in alphabetischer Reihenfolge):

- Babyphones (3/6)*
- Beamer (4/6)
- Digitalkameras (4/5)
- Drucker (3/6)
- DVD-Player (4/5)
- Funkgeräte (3/6)
- GPS-Geräte (3/6)
- Laptops (3/6)
- Mobiltelefone (3/6)
- MP3-Player (4/5)
- Notebooks (3/6)
- PCs (3/6)
- Router (3/6)
- Scanner (3/6)
- Taschenrechner (3/6)
- Tablets (-/6)
- Videospielekonsolen (7/5)

*(Kategorie der bestehenden WEEE-RL/**Kategorie nach Novellierung der WEEE-RL**)

5.2.3 Sortieranalyse vor dem Sammelversuch

Im Juni 2012 erfolgte eine Sortieranalyse zur Ermittlung der Zusammensetzung der Sammelmengen an EKG auf den fünf teilnehmenden RH. Ziel war es, den Anteil wertstoffreicher EKG an der Gesamtsammelmasse herauszufinden. Dazu wurden die Geräte zunächst aus den Sammelbehältern der RH entnommen und einzeln verwogen. Dokumentiert wurden sowohl der Gerätetyp als auch das Gewicht (zum Beispiel Bügeleisen; 0,85 kg). Diese Daten wurden in weiterer Folge in das Computerprogramm Microsoft Excel 2010 eingegeben um weitere Auswertungen durchzuführen. Die sortierten Geräte wurden dann entsprechend der Subgerätekategorien von Huisman et al. (2007) eingeteilt (zum Beispiel Bügeleisen: Kategorie 2, Haushaltsgeräte klein). Abbildung 13 zeigt die Zusammensetzung der EKG-Sammelmengen der einzelnen RH nach Masseprozent. Insgesamt wurden 2,5 Tonnen EKG verwogen. Die jeweiligen Anteile der Gerätekategorien zwischen den RH schwanken relativ stark. Dies ist hauptsächlich auf Zufälligkeiten zurückzuführen, da die Untersuchung auf punktuellen Stichproben beruht. Beispielsweise wurde das Ergebnis eines RH schon relativ stark beeinflusst, wenn ein Tourismusbetrieb seine alten SAT-Receiver aussortierte. Die Säule rechts in Abbildung 13 zeigt zum Vergleich die Zusammensetzung der EKG-Sammelmengen Österreichs für das Jahr 2011. Auffällig ist hier der vergleichsweise hohe Anteil an IKT-Geräten.

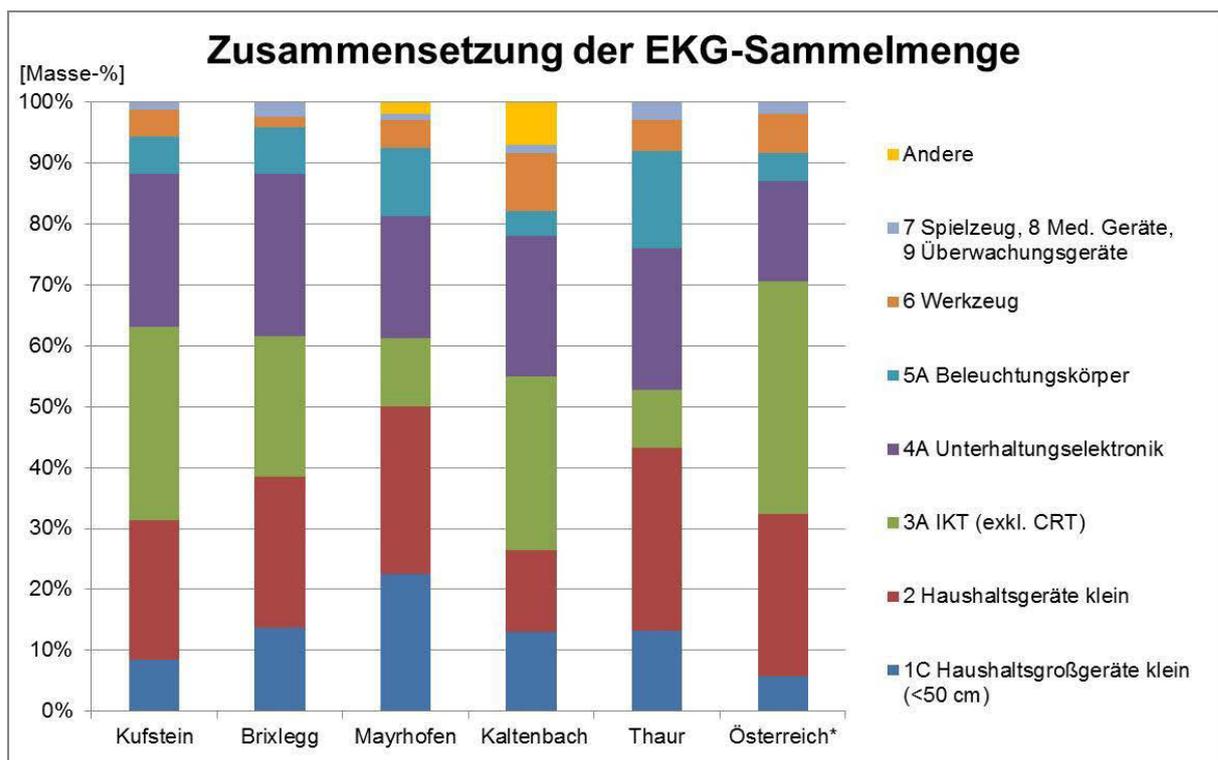


Abbildung 13: Zusammensetzung der EKG-Sammelmengen nach Subkategorien (Huisman et al., 2007; *EAK, 2012)

(Anmerkung: Durch den Einwurf der Geräte in die Sammelbehälter wurden diese teilweise beschädigt und Geräteteile wie zum Beispiel Batterien und Akkumulatoren, Kabel, Leiterplatten, sowie Metall-, Kunststoff-, Glas- und Holzteile brachen ab. Jene Teile, die bestimmten Geräten nicht mehr eindeutig zugeordnet werden konnten,

wurden aliquot allen Gerätekategorien zugerechnet. Die Kategorie „Andere“ besteht aus falsch eingebrachten und nicht zuordenbaren Geräten.)

Anhand der Liste wertstoffreicher EKG fand anschließend eine Unterscheidung in wertstoffreiche bzw. wertstoffarme Geräte statt. Das Ergebnis dieser Auswertung für die jeweiligen RH ist in Tabelle 13 dargestellt. Der durchschnittliche Anteil wertstoffreicher EKG an der Gesamtsortiermasse aller RH betrug 17 %. Zum Vergleich, KERP hat 2011 in Wien Gerätesortierungen durchgeführt. Eine Einteilung entsprechend der Liste wertstoffreicher EKG ergab bei dieser Untersuchung einen durchschnittlichen Anteil von 25 % wertstoffreicher EKG an der Gesamtmasse.

	Kufstein	Brixlegg	Mayrhofen	Kaltenbach	Thaur
GESAMT [kg]	699,05	360,25	497,26	512,04	369,47
wertstoffreiche EKG [kg]	177,29	62,23	38,25	139,61	29,97
Anteil	25%	17%	8%	27%	8%

Tabelle 13: Anteil wertstoffreicher EKG an der Gesamtsortiermasse (Sortierung vor dem Sammelversuch)

Zusätzlich wurde bei der Gerätesortierung der Anteil der „historischen“ EKG festgestellt. Dabei handelt es sich um jene Geräte, die vor dem Inkrafttreten der österreichischen EAG-VO am 13.08.2005 in Verkehr gebracht wurden. Neuere Geräte müssen eine durchgestrichene Abfalltonne auf Rädern als Symbol für die getrennte Sammlung von EEG sichtbar aufweisen (Abbildung 14). Gemäß einem Bescheid des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) vom 25. Juli 2005 übernimmt in Österreich die Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH die Untersuchung des Anteils der historischen EEG (EAK, 2012).



Abbildung 14: Symbol für die getrennte Sammlung von EAG (EAG-VO)

Tabelle 14 fasst die Untersuchungen des Anteils der „historischen“ EKG aus der Gerätesortierung vor dem Sammelversuch zusammen. Der durchschnittliche Anteil „neuer“ EKG an der Gesamtsortiermasse der fünf RH betrug 14 % und liegt damit etwas höher als der historische Anteil an EKG in Österreich 2011 (EAK, 2012). Unter den wertstoffreichen EKG konnte ein durchschnittlicher Anteil von 22 % „neuer“

Geräte festgestellt werden. Damit lag dieser Wert höher im Vergleich zu den wertstoffarmen Geräten. Hier wurde ein durchschnittlicher Anteil an „neuen“ wertstoffarmen EKG von 12 % ermittelt.

	Kufstein	Brixlegg	Mayrhofen	Kaltenbach	Thaur	Österreich (2011)*
Anteil "neuer" EKG an der Gesamtsortiermasse	15%	9%	14%	8%	22%	11%
Anteil "neuer" wertstoffreicher EKG an der Gesamtsortiermasse der wertstoffreichen EKG	32%	25%	29%	5%	19%	
Anteil "neuer" wertstoffarmer EKG an der Gesamtsortiermasse der wertstoffarmen EKG	10%	6%	13%	9%	23%	

Tabelle 14: Untersuchung des Anteils der historischen EKG an der Gesamtsortiermasse (Sortierung vor dem Sammelversuch) (*EAK, 2012)

5.2.4 Einrichtung und Umsetzung des Sammelversuchs

Nächster Schritt bildete das Einrichten der getrennten Erfassung von wertstoffreichen EKG auf den fünf RH. Für die Durchführung des Sammelversuchs im Zeitraum 13. August 2012 bis 10. Dezember 2012 wurden zunächst die MitarbeiterInnen der teilnehmenden RH darüber informiert, welche wertstoffreichen EKG getrennt von den wertstoffarmen Geräten zu sammeln waren. Dazu wurde ihnen eine Liste wertstoffreicher EKG überreicht. Für die BenutzerInnen des Sammelsystems gab es eine deutliche Kennzeichnung und Information auf und abseits der RH, dass es sich um einen wissenschaftlichen Sammelversuch in einem definierten Zeitraum handelte. Plakate mit Demonstration der wertstoffreichen Geräte wurden erstellt (siehe Anhang) und deutlich sichtbar bei den Sammelbehältern auf den RH angebracht. Abbildung 15 zeigt beispielhaft die Umsetzung am RH Kufstein. Das Informationsplakat wurde hier direkt vor dem Sammelbehälter für wertstoffreiche EKG aufgestellt. Des Weiteren wurden Informationsbeiträge über den Sammelversuch in der Zeitung FORUM (Fortschritt im Regionalen Umweltschutz) des ATM veröffentlicht. Im Mittelpunkt der Berichterstattung der Zeitung stehen Informationen über aktuelle Entwicklungen am Abfall-, Energie- und Umweltsektor, sowie über ATM Projekte, gebotene Serviceleistungen, Schulungen und Informationen von allgemeinem Interesse (hauptsächlich aus den 104 Mitgliedsgemeinden) (Würtenberger, 2013).



Abbildung 15: Sammelbehälter für wertstoffreiche EKG und Informationsplakat am RH in Kufstein

Um festzustellen, ob eine getrennte Erfassung wertstoffreicher EKG auf den RH mit vertretbarem Aufwand möglich ist, erfolgte im Sammelversuch von den RH-MitarbeiterInnen eine durchgängige Dokumentation der Sammelmengen (getrennt nach wertstoffreichen und wertstoffarmen EKG). Außerdem wurde der Aufwand für die zusätzliche Sammlung abgeschätzt. Dieser setzte sich hauptsächlich aus dem Platzbedarf für etwaige benötigte Sammelbehälter sowie aus dem zusätzlichen Arbeitsaufwand der MitarbeiterInnen (Nachsortierung, Information der BenutzerInnen des Sammelsystems, Manipulation der Sammelbehälter) zusammen. Tabelle 15 fasst die Erfahrungen der MitarbeiterInnen aus dem Sammelversuch zusammen.

Die Umsetzung der getrennten Sammlung wertstoffreicher EKG im Sammelversuch gestaltete sich auf den RH unterschiedlich:

- Am RH Kufstein wurden wertstoffarme EKG in einem bestehenden 40 m³ fassenden Container gesammelt. Für die Sammlung der wertstoffreichen EKG wurde zusätzlich eine 2 m³ fassende Kunststoffbox bereitgestellt. Anliefernde Personen legten die EKG auf einen Tisch vor den EKG-Sammelbehältern ab. MitarbeiterInnen kappten gegebenenfalls Kabel ab und warfen die EKG in die richtigen Sammelbehälter (wertstoffreich/wertstoffarm). Die getrennt gesammelten wertstoffreichen EKG wurden täglich verwogen und danach in den Sammelcontainer der wertstoffarmen EKG eingebracht. Der Grund dafür waren Befürchtungen des Entsorgers, dass die EKG-Sammelmenge wertstoffberaubt werden würde und er die wertstoffreichen EKG nicht mehr erhalten würde. Daher konnte bei der Gerätesortierung im Sammelversuch nicht der Anteil an Fehlwürfen in den Sammelbehältern der wertstoffreichen bzw. wertstoffarmen EKG festgestellt werden.
- Am RH Kramsach/Brixlegg wurden wertstoffarme EKG in einem bestehenden 10 m³ fassenden Container gesammelt. Für die Erfassung der

wertstoffreichen EKG wurde ein weiterer 10 m³ fassender Container (mit Deckel verschließbar) aufgestellt. Aufgrund mangelnder Platzverhältnisse musste dieser Container neben der RH-Halle (auf dem abgezaunten RH-Grundstück) abgestellt werden. Die wertstoffreichen EKG wurden zunächst getrennt von den restlichen EAG von den MitarbeiterInnen entgegengenommen und in 1-2 m³ fassenden Gitterboxen innerhalb der RH-Halle gelagert. Mittels eines Gabelstaplers wurden dann die vollen Gitterboxen in den Container der wertstoffreichen EKG außerhalb der RH-Halle entleert. Die Behälter für die Sammlung der wertstoffarmen EKG in der RH-Halle wurden ständig bzgl. Fehlwürfe kontrolliert und gegebenenfalls nachsortiert.

- Die Umsetzung der getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG im Sammelversuch am RH Mayrhofen/Brandberg ähnelte jener am AWZ Zillertal Mitte in Kaltenbach, da dafür die gleiche Person verantwortlich war. Aufgrund mangelnder Platzverhältnisse konnten für die Sammlung der wertstoffreichen EKG keine zusätzlichen Behälter bereitgestellt werden. Wertstoffarme und wertstoffreiche EKG wurden getrennt voneinander in vorhandenen Gitterboxen (Fassungsvermögen 1-2 m³) gesammelt. Anliefernde Personen brachten die EKG selbständig in die frei zugänglichen Sammelbehälter ein. Trotz mündlicher Informationen durch die MitarbeiterInnen und schriftlicher Hinweise durch die Plakate mussten falsch eingebrachte Geräte (wenn zeitlich möglich) nachsortiert werden.
- Am Wertstoffhof Thaur konnten ebenfalls aufgrund mangelnder Platzverhältnisse für die Sammlung der wertstoffreichen EKG keine zusätzlichen Behälter bereitgestellt werden. Wertstoffarme und wertstoffreiche EKG wurden getrennt voneinander in vorhandenen Metallcontainern (Fassungsvermögen 1-2 m³) gesammelt. Anliefernde Personen brachten die EKG selbständig unter Aufsicht der RH-MitarbeiterInnen in die frei zugänglichen Sammelbehälter ein.

	Kurfstein	Kramsach / Brixlegg	Mayrhofer / Brandberg	AWZ Zillertal Mitte / Kaltenbach	Thaur
Platzbedarf durch zusätzliche Sammelbehälter	3 m ² Kunststoffbox, die täglich entleert wurde	6 m ² 10m ³ fassender Container mit Deckel; aufgrund mangelnder Platzverhältnisse neben der RH-Halle abgestellt	0 m ² Die Sammlung erfolgte in vorhandenen Gitterboxen (Fassungsvermögen 1-2 m ³), da kein Platz für zusätzliche Sammelbehälter bestand.	0 m ² Die Sammlung erfolgte in vorhandenen Gitterboxen (Fassungsvermögen 1-2 m ³), da kein Platz für zusätzliche Sammelbehälter bestand.	0 m ² Die Sammlung erfolgte in vorhandenen Metallcontainern (Fassungsvermögen 1-2 m ³), da kein Platz für zusätzliche Sammelbehälter bestand.
Zusätzlicher Arbeitsaufwand	2,5 h/Woche	4 h/Woche	1 h/Woche	0,5 h/Woche	0 h/Woche
Umsetzung der getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG	Übernahme und Einwurf der angelieferten EKG in die entsprechenden Sammelbehälter durch RH-MitarbeiterInnen; keine Nachsortierung, da Behälter mit wertstoffreichen EKG täglich entleert wurde	Übernahme und Einwurf der angelieferten EKG in die entsprechenden Sammelbehälter durch RH-MitarbeiterInnen; Sammelbehälter der wertstoffreichen EKG in der RH-Halle wurden ständig bzgl. Fehlwürfe kontrolliert und gegebenenfalls nachsortiert	Einwurf der EKG in die entsprechenden Sammelbehälter direkt durch anliefernde Personen; Nachsortierung durch MitarbeiterInnen	Einwurf der EKG in die entsprechenden Sammelbehälter direkt durch anliefernde Personen; Nachsortierung durch MitarbeiterInnen	Einwurf der EKG in die entsprechenden Sammelbehälter direkt durch anliefernde Personen unter Aufsicht der RH-MitarbeiterInnen; keine Nachsortierung durch MitarbeiterInnen

Tabelle 15: Zusammenfassung des zusätzlichen Aufwands und der Umsetzung der getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf den RH

5.2.5 Sortieranalyse im Sammelversuch

Im Oktober 2012 erfolgte eine weitere Sortieranalyse auf den fünf teilnehmenden RH. Nun konnte die Zusammensetzung der EKG-Sammelungen der wertstoffreichen und wertstoffarmen Sammelbehälter im Sammelversuch ermittelt werden. Ziel war es, den Anteil an Fehlwürfen in den entsprechenden Sammelbehältern festzustellen. Zunächst wurden wieder die Geräte aus den Sammelbehältern entnommen und einzeln verwogen. Dokumentiert wurden sowohl der Gerätetyp als auch das Gewicht. Diese Daten wurden in weiterer Folge wieder in das Computerprogramm Microsoft Excel 2010 eingegeben um weitere Auswertungen durchzuführen. Nachdem die sortierten Geräte entsprechend der Subgerätekategorien von Huisman et al. (2007) eingeteilt wurden, erfolgte anhand der Liste wertstoffreicher Kleingeräte eine Unterscheidung in wertstoffreiche bzw. wertstoffarme EKG. Das Ergebnis der Sortierung der wertstoffarmen Sammelbehälter für drei RH ist in Tabelle 16 dargestellt. Unter den gesammelten wertstoffarmen EKG wurden durchschnittlich 9 % wertstoffreiche EKG als Fehlwürfe gefunden. Tabelle 16 fasst ebenfalls die Zusammensetzung der Fehlwürfe der wertstoffarmen Sammelbehälter zusammen. Es handelt sich dabei um fälschlicherweise eingebrachte wertstoffreiche Geräte wie PCs oder Drucker. Am RH Kramsach/Brixlegg ist der Fehlwurfanteil aus folgenden Gründen höher als bei den anderen RH. Die EKG wurden von den anliefernden Personen auch selbständig in die Sammelbehälter eingebracht, wenn die RH-MitarbeiterInnen keine Zeit für eine Entgegennahme hatten. Wurden wertstoffreiche EKG fälschlicherweise in den 10 m³ fassenden Sammelcontainer für wertstoffarme EKG eingeworfen, konnten sie daraus nur noch schlecht nachsortiert werden. In den beiden anderen RH war eine Nachsortierung aus den 1-2 m³ fassenden Sammelbehältern leichter möglich.

	Brixlegg		Kaltenbach		Thaur	
Gesamte Sortiermenge der wertstoffarmen Sammlung [kg]		407		272		217
Anteil wertstoffreicher EKG (=Fehlwürfe)		16%		9%		2%
Wertstoffreiche EKG (Fehlwürfe in Masse-%)	Tintenstrahldrucker	4%	PC	5%	DVD-Player	1%
	DVD-Player	4%	PC-Laufwerke	2%	Schnurlostelefon	1%
	PC	2%	Digitaler Vorverstärker	1%		
	DVB-Box	2%				
	Andere	4%	Andere	1%	Andere	0%
		16%		9%		2%

Tabelle 16: Gesamtsortiermasse der wertstoffarmen Sammlung (=Zielfraktion) und Anteile der wertstoffreichen EKG (Sortierung während des Sammelversuchs)

(Anmerkung: Es konnte nur der Inhalt der wertstoffarmen Sammelbehälter von drei RH sortiert werden. Beim RH Kufstein wurden die wertstoffreichen EKG täglich nach Verwiegung des Sammelbehälters zu den wertstoffarmen EKG geleert. Beim RH Mayrhofen/Brandberg war eine Sortierung nicht möglich, da der Sammelbehälter der wertstoffarmen EKG kurz vor Ankunft des Sortierteams am RH abgeholt wurde.)

Das Ergebnis der Sortierung der wertstoffreichen Sammelbehälter für vier RH ist in Tabelle 17 dargestellt. Unter den gesammelten wertstoffreichen EKG wurden durchschnittlich 23 % wertstoffarme EKG als Fehlwürfe gefunden. Beim RH

Mayrhofen/Brandberg und dem AWZ Zillertal Mitte in Kaltenbach wurden vergleichsweise hohe Fehlwurfanteile festgestellt. Aufgrund eines Missverständnisses der RH-MitarbeiterInnen wurden wertstoffarme SAT-Receiver und Videorekorder bewusst als wertstoffreiche EKG gesammelt. Tabelle 17 fasst weiters die Geräteanteile der wertstoffreichen Sammelbehälter zusammen. PCs und Drucker (Tintenstrahl-, Laser- und Multifunktionsdrucker) bilden den größten Anteil der richtig gesammelten wertstoffreichen EKG. Bei den RH Kramsach/Brixlegg und Thaur machen allein diese beiden Gerätearten über 80 Masseprozent aus.

	Brixlegg		Mayrhofen		Kaltenbach		Thaur	
Gesamte Sortiermenge der wertstoffreichen Sammlung [kg]		439		211		259		197
Anteil wertstoffreicher EKG [Masse-%]		99%		68%		62%		89%
Wertstoffreiche EKG [Masse-%]	PC	59%	Drucker	29%	PC	27%	PC	52%
	Drucker	28%	PC	26%	Drucker	25%	Drucker	33%
	DVD-Player	5%	DVD-Player	6%	Scanner	5%	Videospielkonsole	3%
	Laptop	2%	Scanner	2%	DVD-Player	4%		
	Videospielkonsole	2%	Laptop	2%	Laptop	2%		
	Andere	2%	Andere	2%	Andere	1%	Andere	1%
	Fehlwürfe	1%	Fehlwürfe	32%	Fehlwürfe	37%	Fehlwürfe	11%
		100%		100%		100%		100%

Tabelle 17: Gesamtsortiermasse der wertstoffreichen Sammlung (=Zielfraktion) und Anteile der wertstoffreichen EKG (Sortierung während des Sammelversuchs)

(Anmerkung: Am RH Kufstein wurden die wertstoffreichen EKG täglich nach Verwiegung des Sammelbehälters zu den wertstoffarmen EKG geleert. Eine Sortierung des wertstoffreichen Sammelbehälters war somit nicht möglich.)

In Tabelle 18 wird die Zusammensetzung der Fehlwürfe (=wertstoffarme EKG) der wertstoffreichen Sammelbehälter demonstriert. Bei den RH Kramsach/Brixlegg und Thaur liegt der Fehlwurfanteil deutlich unter 15 %. Beim RH Mayrhofen/Brandberg und dem AWZ Zillertal Mitte in Kaltenbach liegt der Fehlwurfanteil aufgrund eines Missverständnisses der RH-MitarbeiterInnen deutlich über 30 %. Wertstoffarme SAT-Receiver und Videorekorder wurden hier bewusst als wertstoffreiche EKG gesammelt. Zieht man diese Geräte von den Fehlwürfen ab, so liegt der Fehlwurfanteil deutlich unter 20 %.

	Brixlegg		Mayrhofen		Kaltenbach		Thaur	
Wertstoffarme EKG (Fehlwürfe in Masse-%)	SAT-Receiver	1%	SAT-Receiver	16%	SAT-Receiver	14%	Stereoanlagen	2%
	PC-Zubehör	0%	Videorekorder	3%	Plotter	11%	SAT-Receiver	2%
			Autostartgerät	3%	Videorekorder	7%		
	Andere	0%	Andere	9%	Andere	5%	Andere	7%
Gesamt		1%		32%		37%		11%

Tabelle 18: Geräteanteile der Fehlwürfe der wertstoffreichen Sammlung (=Zielfraktion; Sortierung während des Sammelversuchs)

5.2.6 Mengenauswertung

Abbildung 16 zeigt einen Vergleich der Sammelmengen an EKG nach den fünf teilnehmenden RH von 2010, 2011, 2012 und während des Sammelversuchs. Die Daten stammen aus der durchgängigen Dokumentation der Sammelmengen durch die RH-MitarbeiterInnen vor und während des Versuchszeitraums. Auffällig ist, dass bei allen RH (außer bei jenem in Thaur) die Sammelmengen 2011 im Vergleich zu 2010 deutlich anstiegen. Ein weiterer deutlicher Anstieg bis 2012 wurde dann nur mehr am RH Kufstein verzeichnet. Die jeweils letzte Säule der RH zeigt die auf ein Jahr hochgerechneten Bruttosammelmengen an wertstoffreichen und wertstoffarmen EKG im Sammelversuch. Im Sammelversuch wurde bei allen RH in etwa die gleiche Menge an EKG im Vergleich zur durchschnittlichen Sammelmenge 2012 erfasst. Ohne Korrektur der Fehlwürfe betrug der durchschnittliche Anteil wertstoffreicher EKG an der Gesamtsammelmasse im Sammelversuch 25 %. Weiters werden in Abbildung 16 die Gesamtsammelmengen des Bundeslands Tirol für die Jahre 2010 (3,7 kg/EW.a) und 2011 (3,9 kg/EW.a) dargestellt. Die Daten wurden den Tätigkeitsberichten der EAK (2011 und 2012) entnommen. 2010 liegen die Sammelmengen an EKG aller RH unter jener von Tirol. 2011 überstiegen die Sammelmengen am RH Kramsach/Brixlegg und im AWZ Zillertal Mitte in Kaltenbach jene von Tirol. Hinsichtlich der vorgeschriebenen Sammelziele der novellierten WEEE-RL (bis 2019 wird die Mindestsammelquote schrittweise von zunächst 45% auf 65 % der in den Vorjahren auf den Markt gebrachten EEG angehoben) lässt sich Folgendes feststellen: In Österreich wurden 2011 5,4 kg EKG/EW.a in Verkehr gesetzt. Eine Sammelquote von 45 % verlangt 2,4 kg/EW.a. Dieses Sammelziel würde aus heutiger Sicht von allen RH erfüllt werden. Ein Anstieg der Sammelquote auf 65 % bedeutet 3,5 kg/EW.a. Diese Menge würde vom RH Mayrhofen/Brandberg und vom Wertstoffhof Thaur nicht erreicht werden.

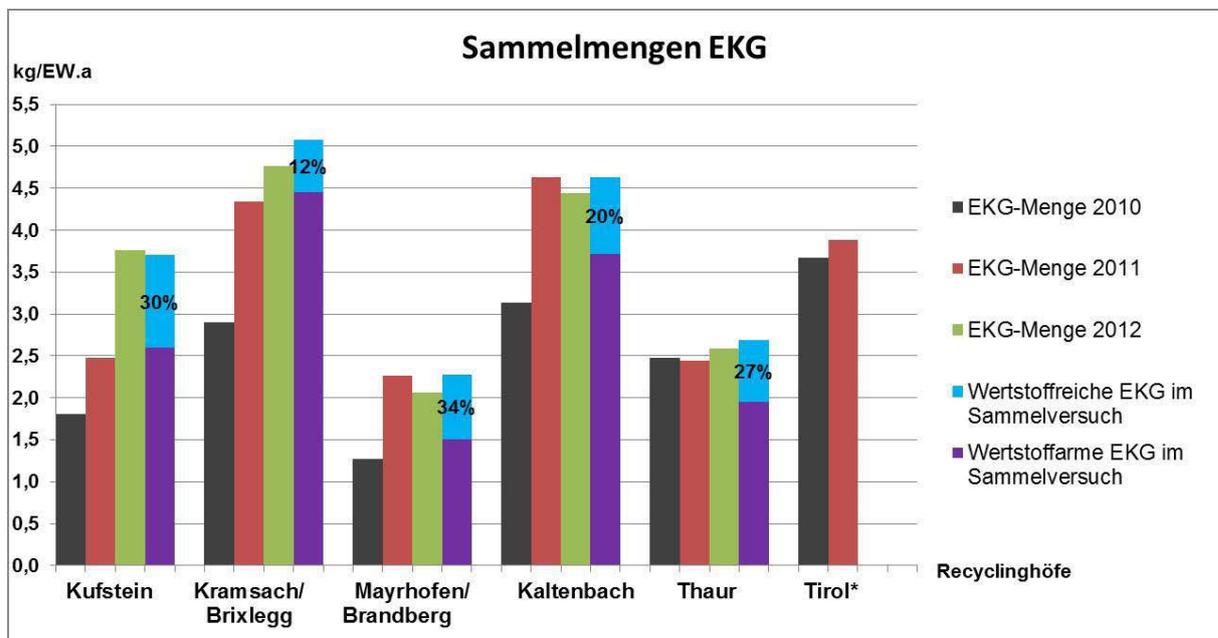


Abbildung 16: Vergleich der EKG-Sammelmengen nach RH von 2010, 2011, 2012 und während des Sammelversuchs (*EAK, 2011 und 2012)

Um die tatsächlichen Nettomengen der getrennt erfassten wertstoffreichen EKG im Sammelversuch zu ermitteln, wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurde

der Bruttoanteil der wertstoffreichen EKG an der Gesamtsammelmasse mit den Fehlwurfanteilen korrigiert. Die jeweiligen Fehlwurfanteile wurden bei der Gerätesortierung im Sammelversuch ermittelt (Tabelle 16 und Tabelle 17). Mit dem errechneten Nettoanteil konnte daraufhin die Nettomenge der getrennt erfassten wertstoffreichen EKG in kg/EW.a festgestellt werden. Bei vier der teilnehmenden RH ließen sich ähnliche Nettomengen ermitteln (0,5 bis 0,7 kg/EW.a). Am RH Kufstein konnten bei der Sortierung im Sammelversuch keine Fehlwurfanteile in den Sammelbehältern der wertstoffreichen und wertstoffarmen EKG erhoben werden. Daher konnte der Bruttoanteil nicht korrigiert werden und die Nettomenge ist hier nicht auswertbar (Tabelle 19).

	Kufstein	Brixlegg	Mayrhofen	Kaltenbach	Thaur
Bruttoanteil der wertstoffreichen EKG an der Gesamtsammelmasse	30%	12%	34%	20%	27%
Nettoanteil der wertstoffreichen EKG an der Gesamtsammelmasse	-	26%	29%	19%	26%
Nettomenge der getrennt erfassten wertstoffreichen EKG [kg/EW*a]	-	0,6	0,5	0,6	0,7

Tabelle 19: Brutto- und Nettoanteile der wertstoffreichen EKG an der Gesamtsammelmasse im Sammelversuch bzw. Nettomengen der getrennt erfassten wertstoffreichen EKG

5.2.7 Auswertung hinsichtlich wertvoller Inhaltsstoffe

In einem weiteren Schritt wurden die EKG hinsichtlich ihrer wertvollen Inhaltsstoffe analysiert. Für diese Auswertungen wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- Zusammensetzung der EKG-Sammelmenge nach Gerätearten
- Durchschnittliche Leiterplattenanteile pro Geräteart
- Durchschnittlicher Edelmetallgehalt der Leiterplatten

Bei den Sortierergebnissen zur Zusammensetzung der EKG-Sammelmengen in Tirol handelte es sich um punktuelle Stichprobenuntersuchungen, die stark durch Zufälligkeiten geprägt waren. Um repräsentative Aussagen bei den folgenden Analysen treffen zu können wurden daher Daten zur Verteilung der Kleingerätearten in Wien nach KERP (2011) herangezogen. Diese Daten stammen aus Untersuchungen über einen längeren Zeitraum (Juli 2011). Für Tirol konnten keine ähnlichen Daten ermittelt werden. Abbildung 17 zeigt die Zusammensetzung der EKG-Arten nach Masseprozent.

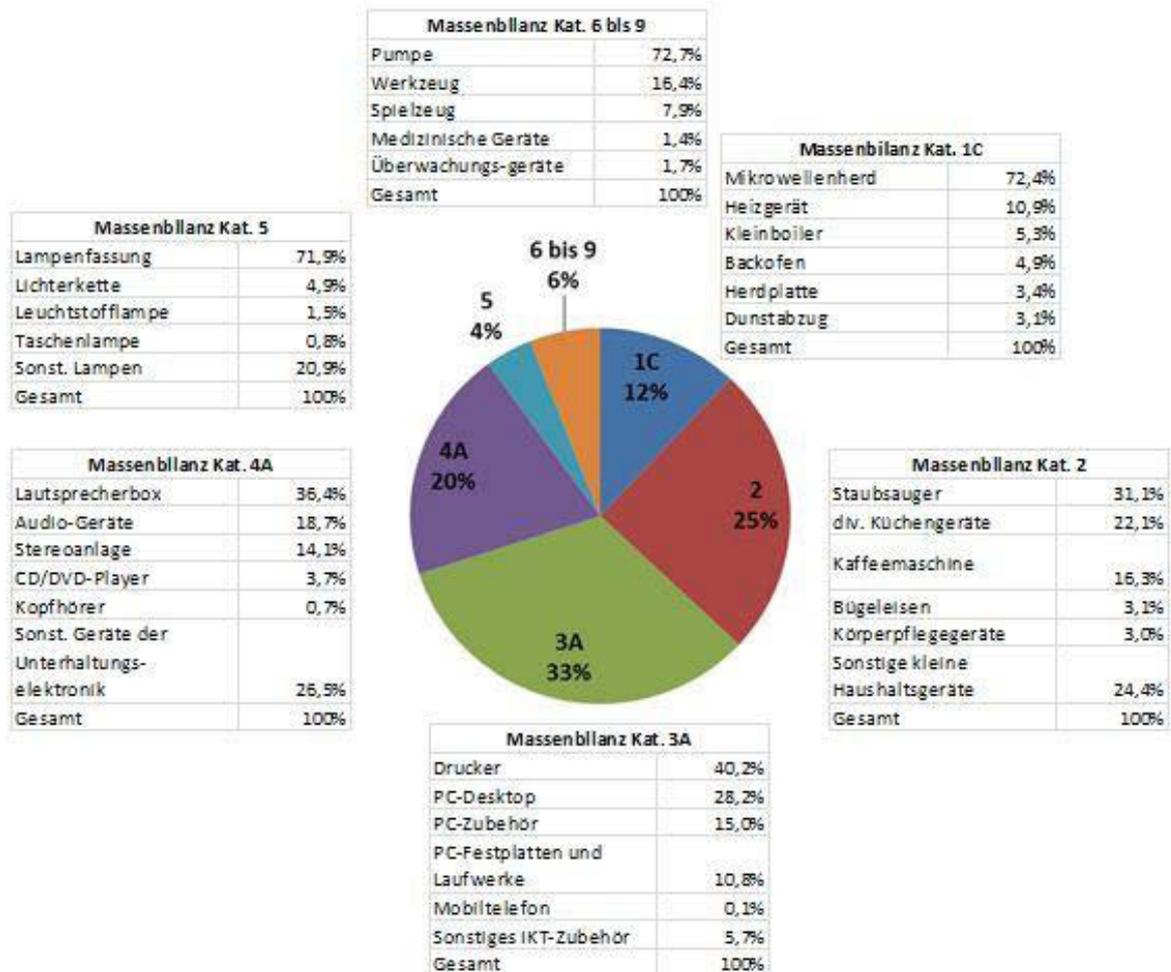


Abbildung 17: Zusammensetzung der EKG-Arten Wiens in Masse-% (nach KERP, 2011)

Durch Einteilung der Gerätearten entsprechend der erstellten Liste wertstoffreicher EKG (Kapitel 5.2.2) wurde ein Anteil von 25 % wertstoffreicher EKG an der Gesamtsammelmasse festgestellt.

Für die Bestimmung der durchschnittlichen Leiterplattenanteile pro Geräteart wurden Daten von Salhofer (2013) verwendet. Für die Bestimmung der durchschnittlichen Edelmetallgehalte der Leiterplatten wurden Ergebnisse verschiedener Untersuchungen aus der Literatur herangezogen (siehe Anhang). Bei der Betrachtung der wertvollen Inhaltsstoffe wurden die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium ausgewählt, da sie für Leiterplatten wertbestimmend sind (Tabelle 7). Obwohl Edelmetalle auch in anderen Geräteteilen (Kabel, Anschlüsse, Stecker) vorkommen (Hagelücken, 2006; Gmünder, 2007) wurden aufgrund der besseren Datenlage ausschließlich die in Leiterplatten enthaltenen Edelmetalle berücksichtigt.

Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung. Die Berechnungen wurden auf Basis der EKG-Zusammensetzung von KERP (2011) für eine EKG-Menge von einer Tonne durchgeführt. Die Edelmetallmengen wurden durch Multiplikation der Materialzusammensetzung mit der Edelmetallkonzentration der Leiterplatten ermittelt. Die berechneten Edelmetallmengen für eine Tonne EKG betragen insgesamt 5,8 g Gold, 28 g Silber und 2,3 g Palladium.

MASTERARBEIT
Sammelversuch zur getrennten Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte

Geräteart	Sub-kategorie	Masse [kg/t]	Leiterplatten-anteil [%]*	Edelmetallgehalt der Leiterplatten [g/t]			Edelmetallmenge [g/t]		
				Au	Ag	Pd	Au	Ag	Pd
Bügeleisen	2	7,8	-						
div. Küchengeräte	2	55,3	-						
Körperpflegegerät	2	7,5	-						
Kaffeemaschine	2	40,8	-						
Staubsauger	2	77,8	0,1	44	152	14	0,004	0,014	0,001
Sonstige kleine Haushaltsgeräte	2	61,0	-						
Pumpe	6	43,6	-						
Werkzeug	6	9,8	-						
Spielzeug	7	4,7	3,8	89	365	18	0,016	0,065	0,003
Medizinische Geräte	8	0,8	-						
Überwachungsgerät	9	1,0	-						
Backofen	1C	5,9	1,4	44	152	14	0,004	0,013	0,001
Heizgerät	1C	13,1	-						
Herdplatte	1C	4,1	-						
Dunstabzug	1C	3,7	-						
Mikrowellenherd	1C	86,9	0,5	44	152	14	0,019	0,065	0,006
Kleinboiler	1C	6,4	-						
PC-Zubehör	3A	49,5	10,7	44	152	14	0,323	0,801	0,074
Sonst. IKT-Gerätezubehör	3A	35,6	10,7	44	152	14	0,167	0,577	0,053
Audio-Geräte	4A	37,4	9,9	31	674	14	0,115	2,493	0,052
Kopfhörer	4A	1,4	-						
Lautsprecherbox	4A	72,8	0,5	44	152	14	0,015	0,052	0,005
Stereoanlage	4A	28,2	10,5	6	57	14	0,018	0,169	0,041
Sonst. Geräte der Unterhaltungselektronik	4A	53,0	9,9	31	674	14	0,162	3,533	0,073
Lampenfassung	5A	28,8	-						
Leuchtstofflampe	5A	0,6	-						
Lichterkette	5A	2,0	-						
Taschenlampe	5A	0,3	-						
Sonst. Lampen	5A	8,4	-						
Summe wertstoffarme EKG		748,0					0,751	7,782	0,310
Drucker	3A	132,7	5,5	43	210	15	0,307	1,518	0,108
Mobiltelefon	3A	0,3	18,9	949	3753	291	0,059	0,234	0,018
PC-Desktop	3A	93,1	12,3	332	847	104	3,8	9,702	1,187
PC-Festplatten und Laufwerke	3A	18,5	20,7	205	2111	180	0,796	8,2	0,689
CD/DVD-Player	4A	7,4	9,2	125	705	21	0,085	0,481	0,014
Summe wertstoffreiche EKG		252,0					5,048	20,136	2,028
Summe		1000					5,799	27,917	2,338

Tabelle 20: Abschätzung des Gehalts an Gold, Silber und Palladium von 1 Tonne EKG (*Salhofer, 2013)

In Abbildung 18 wird das Aufkommen an EKG mit der Herkunft der insgesamt in EKG enthaltenen Wertstoffe verglichen. Obwohl wertstoffreiche EKG nur ein Viertel der Gesamtmasse ausmachen, enthalten sie einen Großteil des insgesamt in allen EKG vorhandenen Goldes (87 %), Silbers (72 %) und Palladiums (87 %).

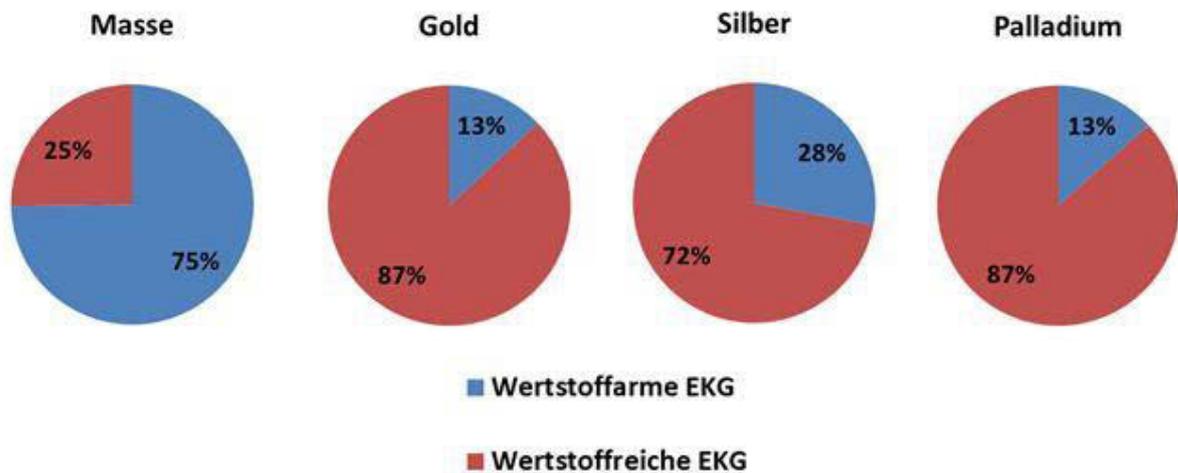


Abbildung 18: Vergleich des Aufkommens an EKG und der Herkunft des insgesamt enthaltenen Goldes, Silbers und Palladiums

Verglichen mit Ergebnissen anderer Untersuchungen ergibt sich ein ähnliches Bild. Chancerel und Rotter (2009) untersuchten mittels Stoffflussanalysen regionale Goldflüsse bei der EAG-Behandlung in Deutschland 2007 (Abbildung 3). Sie zeigten, dass trotz dem geringem Massenanteil im Vergleich zu anderen EKG, wertstoffreiche EKG aufgrund der hohen Goldkonzentration für Edelmetallverluste relevant sind: „Über 75 % des Aufkommens sind minderwertige Geräte, die aber ‚nur‘ ca. 27 % des Goldaufkommens ausmachen“ (Chancerel und Rotter, 2009, 41). Oguchi et al. (2012) berichten, dass in zahlreichen japanischen Gemeinden Versuche zur getrennten Sammlung und Vorsortierung von EKG durchgeführt werden. In Hitachi werden zehn EKG-Arten in Containern bei öffentlichen Sammelinseln getrennt erfasst und aus kommunal gesammelten Abfällen aussortiert. Es handelt sich dabei um Autonavigationsgeräte, Digitalkameras, elektronische Wörterbücher, kleine tragbare Computer, Ladegeräte, Mobiltelefone, Taschenrechner, Textverarbeitungsgeräte, tragbare Audiogeräte und Videospielekonsolen. Oguchi et al. (2012) untersuchten die Auswirkungen der getrennten Erfassung dieser Geräte auf die Stoffströme des herrschenden kommunalen Abfallbehandlungssystems am Beispiel von Edelmetallen. Die Ergebnisse dieser Studie in Bezug auf Gold sind in Abbildung 19 dargestellt. Bei der konventionellen Behandlung von EAG gelangen nach dem Shreddern 74 % des enthaltenen Goldes in die Shredderfeinfraktion. Da dieses Material direkt auf Deponien abgelagert wird, geht das Gold damit verloren. Obwohl die zehn getrennt erfassten EKG-Arten nur 4 % des Aufkommens ausmachen, kann durch ihre Sammlung vor dem Shreddern 22 % des gesamten Goldaufkommens separiert und gezielt in Edelmetallhütten rückgewonnen werden. Durch die getrennte Sammlung von nur zehn EKG-Arten kann der Goldanteil, der durch Deponierung verloren geht von 74 % auf 57 % reduziert werden. Durch die Sammlung können weiters 54 % des insgesamt in EAG enthaltenen Silbers und 11 % des Palladiums vor dem Shreddern gerettet werden.

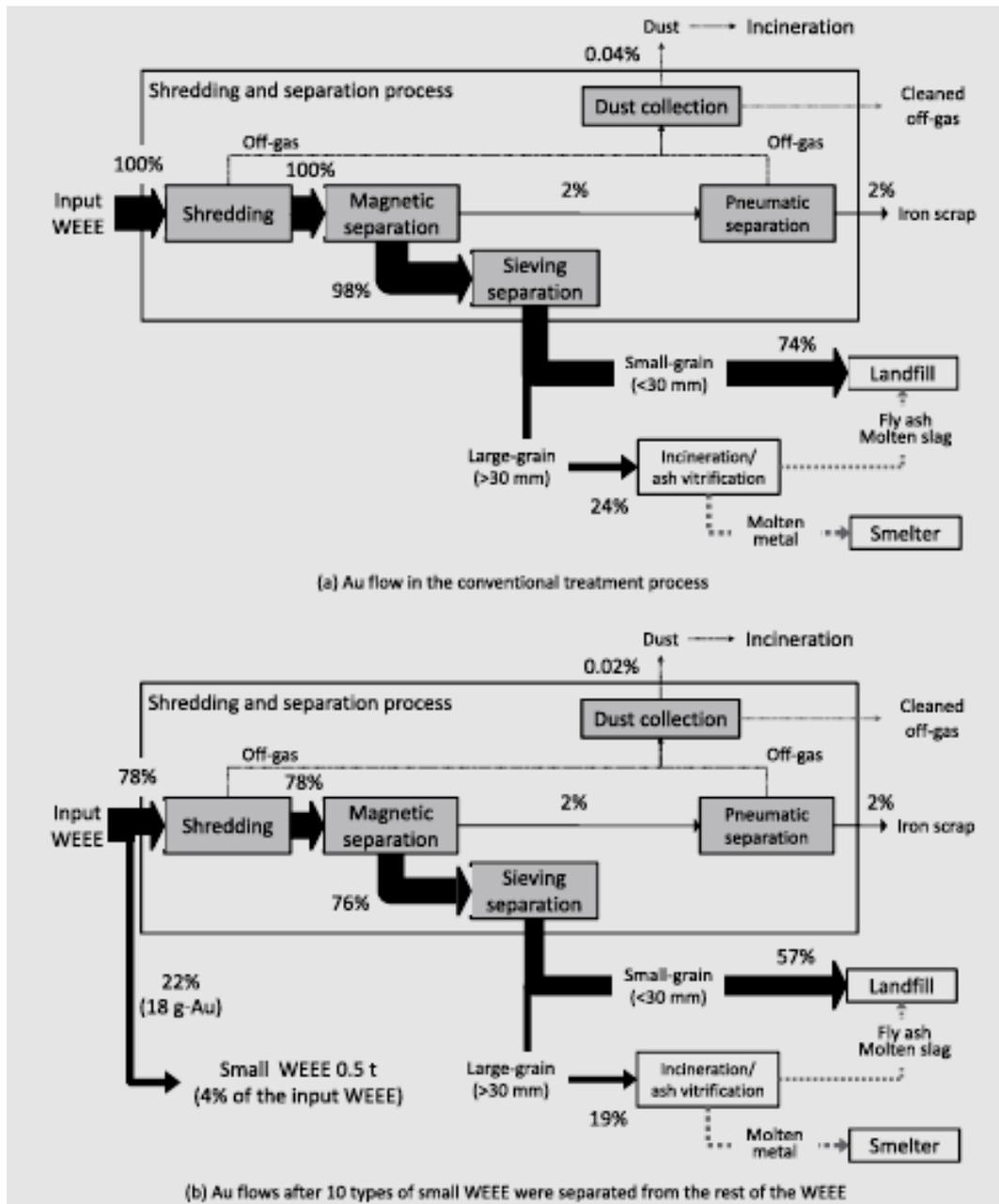


Abbildung 19: Abschätzung der Goldströme bei der konventionellen Behandlung von EAG und nach der getrennten Erfassung von 10 wertstoffreichen EKG-Arten (Oguchi et al., 2012)

6. Schlussfolgerungen

Trotz der etablierten Sammelsysteme und der unterstützenden Gesetzgebung werden nur geringe Mengen der anfallenden EAG ordnungsgemäß gesammelt und behandelt. Schwachstellen existieren vor allem am Beginn der Recyclingkette durch die nicht-getrennte Sammlung der wertstoffreichen EAG sowie durch eine mangelnde Behandlung, vor allem bei der Aufbereitung der Geräte. Edelmetallverluste resultieren aus organisatorischen und logistischen Problemen und nicht aus einem Mangel an geeigneten Verwertungsverfahren. Die heterogene Materialzusammensetzung, enorme Typenvielfalt und rasche technologische Entwicklung von EAG erschwert zudem eine effiziente Edelmetallrückgewinnung.

In der EU bildet die WEEE-RL den rechtlichen Rahmen für die Sammlung und Behandlung von EAG. Das seit 2007 geltende Sammelziel von 4 kg/EW.a wird durch die Novellierung der Richtlinie schrittweise bis 2019 auf mindestens 65 % der in den Vorjahren auf den Markt gebrachten Elektrogeräte angehoben. Allerdings unterscheiden die festgelegten Sammelziele nicht zwischen den einzelnen EAG-Arten. Deshalb ist es einfacher, sich bei der EAG-Sammlung auf große, schwere Geräte zu fokussieren, um die Sammelziele zu erreichen.

EKG machen zwar nur einen Bruchteil der EAG-Gesamtmenge aus, enthalten aber einen Großteil der insgesamt in EAG vorhandenen Edelmetalle. Bei einer Behandlung eines gemischten Inputs an EKG (Geräte mit hohem und geringem Wertstoffanteil) ist die Behandlung zu wenig auf die Rückgewinnung von hochwertigen Komponenten ausgerichtet. Wertvolle Ressourcen wie Edelmetalle werden daher nur in geringem Umfang zurückgewonnen. Eine getrennte Verwertung der wertstoffreichen EKG ist vorteilhaft. Die Edelmetalle werden nicht übermäßig in der Materialmatrix verdünnt, sodass weniger Aufwand zum Sortieren und Trennen notwendig ist. Die auf den Leiterplatten in Spuren vorhandenen Edelmetalle können durch eine zu starke Zerkleinerung abplatzen und mit dem Staub verloren gehen. Durch angepasste Prozesse können bis zu 80-90 % der Edelmetalle zurückgewonnen werden. Zudem bietet sich für größere EKG wie Computer, Drucker oder Laptops auch eine manuelle Demontage der wertstoffreichen Komponenten an. Bei dieser Aufbereitung sind die Verluste ebenfalls geringer und aufgrund der hohen Wertigkeit der gewonnenen Materialien sind die Verfahren auch wirtschaftlich. Im Hinblick auf Ressourcenschutzaspekte sollten daher besonders wertstoffreiche EKG getrennt behandelt werden. Voraussetzung dafür ist die getrennte Sammlung der wertstoffreichen EKG. Als Anreiz könnten dafür spezifische Sammelraten dienen.

Um die Umsetzbarkeit einer getrennten Sammlung wertstoffreicher EKG zu testen wurde 2012 ein wissenschaftlicher Sammelversuch auf fünf RH durchgeführt. Aus diesem Praxistest können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Mittels einer Sortieranalyse vor dem Sammelversuch wurde die Zusammensetzung der EKG-Sammelmasse untersucht. Die jeweiligen Anteile der Gerätekategorien zwischen den RH schwankten relativ stark. Dies ist hauptsächlich auf Zufälligkeiten zurückzuführen, da die Untersuchung auf punktuellen Stichproben beruhte.

Durch Einteilung der Geräte entsprechend einer erstellten Liste wertstoffreicher EKG wurde ein durchschnittlicher Anteil von 17 % wertstoffreicher EKG an der Gesamtsammelmasse festgestellt.

Unter den sortierten wertstoffreichen EKG konnte ein durchschnittlicher Anteil von 78 % „historischer“ Geräte festgestellt werden. Dieser Wert lag niedriger im Vergleich zu den wertstoffarmen Geräten. Hier wurde ein durchschnittlicher Anteil an „historischen“ wertstoffarmen EKG von 88 % ermittelt. Dieser Unterschied könnte auf die kürzeren Innovationszyklen bei den IKT-Geräten und den Geräten der Unterhaltungselektronik zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse des Sammelversuchs zeigen, dass eine getrennte Erfassung wertstoffreicher EKG auf den RH mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Dieser Aufwand setzte sich aus dem Platzbedarf für etwaige benötigte Sammelbehälter, sowie aus dem zusätzlichen Arbeitsaufwand zusammen. Bei 2 RH konnten problemlos zusätzliche Sammelbehälter für die Erfassung der wertstoffreichen EKG aufgestellt werden. Auf 3 RH erfolgte die Sammlung aufgrund der mangelnden Platzverhältnisse in vorhandenen Gitterboxen. Der zusätzliche Arbeitsaufwand wurde von den RH-MitarbeiterInnen auf 0-4 Wochenstunden eingeschätzt. Der Arbeitsaufwand setzte sich aus der Nachsortierung falsch eingebrachter Geräte, der Information der BenutzerInnen des Sammel-systems und der Manipulation der Sammelbehälter zusammen. Der Arbeitsaufwand wurde auch dort höher eingeschätzt, wo die RH-MitarbeiterInnen die Übernahme und den Einwurf der angelieferten EKG in die entsprechenden Sammelbehälter durchführten. Alle Beteiligten waren sich einig, dass es sich bei dem zusätzlichen Arbeitsaufwand hauptsächlich um einen Aufwand zu Beginn der Sammelumstellung handelte. Längerfristig würde die Sammlung wertstoffreicher Geräte keinen nennenswerten Arbeitsaufwand und Platzbedarf bedeuten, da die Sammlung in vorhandenen Sammelbehältern auch ohne Probleme funktionierte.

Mittels einer Sortieranalyse während des Sammelversuchs wurde ermittelt, wie hoch der Fehlwurfanteil bei der Sammlung der Geräte lag. Unter den gesammelten wertstoffarmen EKG wurden durchschnittlich 9 % wertstoffreiche EKG als Fehlwürfe gefunden. Korrigiert man das Missverständnis der RH-MitarbeiterInnen am RH Mayrhofen/Brandberg und am AWZ Zillertal Mitte, so liegt der Fehlwurfanteil bei der Sammlung der wertstoffreichen EKG bei allen RH unter 20 %. Kleinere Sammelbehälter wie Gitterboxen waren für die Nachsortierung falsch eingebrachter EKG vorteilhafter als große Sammelbehälter wie Container.

Die Sammelmengen haben sich auf allen RH auf einem hohen Niveau stabilisiert. Im Sammelversuch wurde bei allen RH in etwa die gleiche Menge an EKG im Vergleich zur durchschnittlichen Sammelmenge 2012 erfasst. Nach Berücksichtigung der Fehlwürfe konnten im Sammelversuch etwa 0,5-0,7 kg/EW.a an wertstoffreichen EKG pro RH getrennt gesammelt werden.

Insgesamt wurde der Sammelversuch von allen Beteiligten sehr positiv bewertet. Die engagierten RH-MitarbeiterInnen berichteten von zahlreichen BenutzerInnen des Sammel-systems, die besonders der Ressourcenaspekt der getrennten Sammlung interessierte. Auch während den Sortieranalysen auf den RH entwickelten sich angeregte Diskussionen mit vielen anliefernden Personen über die Motivation einer getrennten Erfassung wertstoffreicher Geräte.

Eine Analyse hinsichtlich der wertvollen Inhaltsstoffe (Gold, Silber, Palladium) von EKG verdeutlicht, dass schon durch die Sammlung einer geringen Menge bestimmter Kleingeräte ein großes Wertstoffpotential erfasst wird. Die dafür nötige Literaturrecherche ergab, dass sich die AutorInnen bei ihren Untersuchungen entweder auf bestimmte Gerätearten oder einzelne Edelmetalle konzentrieren. Ein Großteil der AutorInnen nutzt Sekundärdaten und Annahmen, um Edelmetallkonzentrationen in Geräten bzw. Gerätekomponenten zu bestimmen. Ergebnisse aus experimentellen Analysen findet man hauptsächlich bei wertstoffreichen Geräten wie PCs und Mobiltelefonen. Sander et. al (2012) verweisen diesbezüglich auf diverse Schwierigkeiten bei der Bestimmung der in EAG enthaltenen Metallmengen. Beispielsweise führen die kurzen Innovationszyklen im Elektroniksektor zu zahlreichen neuen Produktvarianten innerhalb kurzer Zeit. Deshalb liegen lediglich für einen geringen Anteil der auf dem Markt eingeführten Geräte aktuelle wissenschaftliche Ergebnisse vor.

Um die Edelmetallrückgewinnung entlang der gesamten Recyclingkette zu verbessern ist eine getrennte Erfassung wertstoffreicher Geräte unabdingbar. Die getrennte Sammlung bestimmter Gerätearten verlangt aber nach einer genauen Kenntnis der in den Geräten enthaltenen Wertstoffe. Zum Beispiel existieren kaum Daten zu den Edelmetallgehalten in anderen Gerätekomponenten als Leiterplatten. Daher besteht ein Forschungsbedarf nach gesicherten Daten zu Wertstoffgehalten in den verschiedenen Gerätearten bzw. -komponenten und nach den Veränderungen der Wertstoffgehalte im Zeitverlauf.

Literaturverzeichnis

- Blaser, F. und Schluop, M., 2012. Economic Feasibility of e-Waste Treatment in Tanzania. St. Gallen: United Nations Industrial Development Organization.
- Beigl, P., Schneider, S. und Salhofer, S., 2012. Take back systems for mobile phones – review and recommendations. *Waste and Resource Management*, 165, 25-35.
- BMLFUW, 2011a. Bundes-Abfallwirtschaftsplan. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- BMLFUW, 2011b. Abfallbehandlungspflichtenverordnung. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Verfügbar in: <http://www.lebensministerium.at/umwelt/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/abpvo.html> [Abfrage am 12. August 2012].
- Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D. und Pingel, D., 2012. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Darmstadt: Oeko-Institut e.V..
- Chancerel, P., Meskers, C., Hagelüken, C. und Rotter V. S., 2008. E-scrap metals too precious to ignore. *Recycling International*, November, 42-45.
- Chancerel, P., Meskers, C., Hagelüken, C. und Rotter V. S., 2009. Assessment of Precious Metal Flows during Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 5, 791-810.
- Chancerel, P. und Rotter, V. S., 2009. Stoffstromanalyse für die Behandlung von Kleingeräten in Deutschland – Beispiel Gold. In: Bilitewski, B., Werner, P. und Janz, A., Hrsg. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten. Dresden: Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, 43-54.
- Chancerel, P., Bolland, T. und Rotter, V. S., 2010. Status of pre-processing of waste electrical and electronic equipment in Germany and its influence on the recovery of gold. *Waste Management & Research*, 0, 1-9.
- Chancerel, P., 2010. Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment - An assessment of the recovery of gold and palladium. Diss. Technische Universität Berlin.
- Coesfeld, C. und Steinfeld, T., 2013. Recyclingtechnologie - Aurubis' Multi-Metal-Recycling. Hamburg: Aurubis AG. Verfügbar in: <http://www.aurubis.com/de/geschaeftsfelder/rohstoffe/recycling/technik/> [Abfrage am 19. Juli 2013].
- Cui J. und Forssberg E., 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials* 99 (3), 243-263.

Cui, J. und Zhang, L., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256.

Cui, J. und Roven, H. J., 2011. Electronic waste. In: Letcher, T. und Vallero, D., Hrsg. *Waste: A Handbook for Management*. s.l.: Academic Press und Elsevier, 281-296.

De Oliveira, C. R., Bernardes, A. M. und Gerbase, A. E., 2012. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Management*, 32 (2012), 1592-1610.

Deubzer, O., 2007. Explorative Study into the Sustainable Use and Substitution of Soldering Metals in Electronics. Diss. Technische Universität Delft.

Dimitrakakisa, E., Janz, A., Bilitewski, B. und Gidarakosa, E., 2008. Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 913-919.

EAK, 2011. Tätigkeitsbericht 2010. Wien: Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.

EAK, 2012. Tätigkeitsbericht 2011. Wien: Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.

EMPA, 2009. Swiss e-Waste Programme. St. Gallen: EMPA. Verfügbar in <http://www.dw.de/informal-recycling-of-e-waste-a-serious-problem-expert-says/a-16765294> [Abfrage am 23. April 2013].

ESG, 2013. Leiterplatten-Recycling. Rheinstetten: Edelmetall-Service GmbH & Co. KG. Verfügbar in: <http://www.scheideanstalt.de/recycling/leiterplatten/leiterplatten-recycling> [Abfrage am 05. November 2012].

Europäische Union, 2006. Basler Übereinkommen. s.l.: Europäische Union. Verfügbar in: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/waste_management/l28043_de.htm [Abfrage am 08. September 2012].

Europäische Kommission, 2012. RoHS 2 FAQ guidance document. s.l.: Europäische Kommission.

Florenz, K., 2011. Entwurf einer legislativen Entschließung des Europäischen Parlaments zum Standpunkt des Rates im Hinblick auf den Erlass der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. s.l.: Europäisches Parlament.

Freegard K., und Claes, M., 2009. Compositional Analysis of Kerbside Collected Small WEEE. Oxon: Axion Recycling Ltd.

Gmünder, S., 2007. Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations. Diplomarbeit. EMPA und ETH Zürich.

Goosey, M. und Kellner, R., 2002. A Scoping Study - End-of-Life Printed Circuit Boards. Makati City: Intellect and the Department of Trade and Industry.

Hagelüken, C., 2006. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment, 8-11 May 2006, San Francisco, 218-223.

Hagelüken, C. und Buchert, M., 2008. The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices. Salzburg: IERC.

Hagelüken, C. und Meskers, C., 2008. The Treasure in our Trash – Opportunities and Challenges to Recover Scarce and Valuable Metals from End-of-Life Electronic Devices. Hanau: Umicore Precious Metals Refining.

Hagelüken, C., 2009. Edelmetallverluste bei Export und Aufbereitung von Elektronikschrott in Drittländer. In: Bilitewski, B., Werner, P. und Janz, A., Hrsg. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten. Dresden: Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, 133-142.

Hagelüken, C., 2010a. Edelmetalle. Schriftenreihe der GDMB, 121, 1-9.

Hagelüken, C., 2010b. Edelmetallrecycling. Schriftenreihe der GDMB, 121, 10-26.

Hischier, R., Wäger, P. und Gauglhofer, J., 2005. Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). Environmental Impact Assessment Review 25, 525-539.

Huisman, J., 2004. QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden. The eco-efficiency of the direct smelter route versus mandatory disassembly of Printed Circuit Boards. Stockholm: EI-Kretsen.

Huisman, J., Delgado, C., Magalini, F., Kuehr, R., Maurer, C., Artim, E., Szlezak, J., Ogilvie, S., Poll, J. und Stevels, A., 2007. 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – Final Report. Bonn: United Nations University.

Huisman, J., van der Maesen, M., Eijsbouts, R.J.J., Wang, F., Baldé, C.P. und Wielenga, C.A., 2012. The Dutch WEEE Flows. Bonn: United Nations University.

Keller, M., 2006. Assessment of Gold Recovery Processes in Bangalore, India - And Evaluation of an Alternative Recycling Path for Printed Wiring Boards. Diplomarbeit. ETH Zürich.

KERP, 2011. WEEE-Basket Analysen. Wien: KERP.

Klapwijk, P., 2012a. Platinum & Palladium Survey 2012. London: Thomson Reuters GFMS.

Klapwijk, P., 2012b. World Silver Survey 2012. New York: Thomson Reuters GFMS.

Krebs, W., Brombacher, C., Bosshard, P., Bachofen, R., und Brandl, H., 1997. Microbial recovery of metals from solids. *FEMS Microbiol. Rev.*, 20, 605-617.

Langen, M., Weber, H., Sabrowski, R. und Oetjen-Dehne, R., 2008. Erfahrungen mit dem System GelbeTonneplus in der Stadt Leipzig und dem Land Berlin. *Müll und Abfall*, 5, 236-240.

Lee, J., Kima, Y. und Lee, J-c., 2012. Disassembly and physical separation of electric/electronic components layered in printed circuit boards (PCB). *Journal of Hazardous Materials*, 241-242, 387-394.

Manhart, A., 2010. International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 1 (15), 13-30.

Martens, H., 2011. *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*. Heidelberg: Springer.

Maschinda, A. und Widinski, M., 2003. Bericht über die Studie zur Evaluierung von Systemvarianten und Finanzierungsmodellen zur Umsetzung der Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Meskers, C., Hagelüken, C., Salhofer, S. und Spitzbart, M., 2009. Impact of pre-processing routes on precious metals recovery form PCs. *Proceedings EMC 2009*, Innsbruck.

Meskers, C. und Hagelüken, C., 2009. The impact of different pre-processing routes on the metal recovery from PCs. Davos: EMPA Material Science and Technology.

Morin, D., Lips, A. und Pinches, T., 2006. BioMinE – Integrated project for the development of biotechnology for metal-bearing materials in Europe. *Hydrometallurgy*, 83, 69-76.

Mulder, L., Scheidt, L. G. und Schneider, A., 1999. *Collecting Electronic Waste in Europe: A Sony View*. Stuttgart: Sony International (Europe) GmbH.

N.N., 2012. Novelle zur WEEE-Richtlinie vom Europäischen Parlament verabschiedet. Osnabrück: Hellmann Process Management GmbH & Co. KG. Verfügbar in:
http://www.umweltmanager.net/fileadmin/redakteure/DAM/Dokumente/Novelle_zur_WEEE.pdf [Abfrage am 08. September 2012].

Obersteiner G., Linzner R., Pertl A., Scherhauser S und Schmied E., 2010. Formalisation of Informal Sector Activities in Collection and Transboundary Shipment of Waste in and to Cee – Introduction to the Project “Transwaste”. Wien: Institut für Abfallwirtschaft der Universität für Bodenkultur.

Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A. und Kameya, T., 2011. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, 31, 2150-2160.

Oguchi, M., Sakanakura, H., Terazono, A. und Takigami, H., 2012. Fate of metals contained in waste electrical and electronic equipment in a municipal waste treatment process. *Waste Management*, 32, 96-103.

Ongondo, F. O., Williams, I. D. und Cherrett, T. J., 2010. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, 31 (2011), 714-730.

Prelle, R., 2009. „Illegaler“ Export von EAG: Rechtliche Situation und juristische Modifikationen zur Unterbindung. In: Bilitewski, B., Werner, P. und Janz, A., Hrsg. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten. Dresden: Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, 143-155.

Puckett, J., Westervelt, S., Gutierrez, R. und Takamiya, Y., 2005. The Digital Dump – Exporting Re-Use and abuse to Africa. Seattle: Basel Action Network.

Ratz, B., 2013. Problemstoffsammlung in Wien. Wien: Magistratsabteilung 48. Verfügbar in: <http://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/entsorgung/problemstoffsammlung> [Abfrage am 10. Juni 2013].

Rochat, D., Hagelüken, C., Keller, M. und Widmer, R., 2007. Optimal recycling for printed wiring boards in India. In: Hilty, L.M., Edelman, X. und Ruff, A., Hrsg. R'07 world congress Recovery of Materials and Energy for Resource Efficiency. St. Gallen: EMPA.

Rotter, V. S., Janz, A. und Bilitewski, B., 2006. Charakterisierung elektrischer und elektronischer Altgeräte (EAG) – Teil 2: Gerätekenzzahlen zur Ableitung von Erfassungs- und Verwertungsstrategien. *Müll und Abfall*, 8, 424-433.

Rotter, V. S. und Flamme, S., 2013. Recycling of highly functional and strategically important metals from WEEE – Current status and future perspectives. Salzburg. Verfügbar in: http://www.upgrade.tu-berlin.de/data/130117_IERC_2013_Rotter_ver2.pdf [Abfrage am 26. Juni 2013].

Salhofer, S., Spitzbart, M., Schöps, D., Meskers, C., Kriegl, M. und Panowitz, G., 2009. Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Wertstoffen aus Elektroaltgeräten. In: Bilitewski, B., Werner, P. und Janz, A., Hrsg. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten. Dresden: Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Technische Universität Dresden, 33-42.

Salhofer, S. und Tesar, M., 2010. Assessment of removal of components containing hazardous substances from small WEEE in Austria. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1481–1488.

Salhofer, S., 2013. Persönliche Mitteilung vom 28. März 2013.

Sander, K., Schilling, S., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., von Gries, N. und Hobohm, J., 2012. Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten – Meilensteinbericht August 2012. Verfügbar in <http://www.oekopol.de/archiv/material/RePro%20Meilensteinbericht%201.pdf> [Abfrage am 02. Juli 2013].

Schippers, A., 2009. Biomining zur Metallextraktion aus Erzen und Abfällen. AMS Online, 1, 28-34.

Singhal, P., 2006. Integrated Product Policy Pilot on Mobile Phones. Espoo: Nokia Corporation.

Spitzbart, M., Salhofer, S. und Gilge, A., 2010. Variante zur Erfassung von Elektrokleingeräten in der Stadt Wien - TB1-Analyse/Best-Practice-Beispiele. Wien: KERF.

Tanskanen, P., 2012. Management and recycling of electronic waste. Acta Materialia, 61 (2013), 1001-1011.

Tesar, M. und Öhlinger, A., 2009. Elektroaltgerätebehandlung in Österreich. Wien: Umweltbundesamt GmbH.

UNEP, 2005. E-waste, the hidden side of IT equipment's manufacturing and use. Environment Alert Bulletin 5. Verfügbar in: http://www.grid.unep.ch/products/3_Reports/ew_ewaste.en.pdf [Abfrage am 23. Juni 2013].

Wang, F., Huisman, J., Meskers, C., Schlupe, M., Stevels, A. und Hagelüken, C., 2012. The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. Waste Management, 32, 2134-2146.

Wang, X. und Gaustad, G., 2012. Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards. Waste Management, 32 (2012), 1903-1913.

Würtenberger, A., 2013. Forum. Schwaz: Abfallwirtschaft Tirol Mitte GmbH. Verfügbar in: <http://www.atm-online.at/index.php?page=forum> [Abfrage am 24. April 2013].

Yokoyama, S. und Iji, M., 1997. Recycling of printed wiring boards with mounted electronic parts. Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium, 109-114.

Yu, J., Williams, E. und Ju, M., 2009. Review and Prospects of Recycling Methods for Waste Printed Circuit Boards. Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 1-5.

Rechtsquellen

Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft - Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002). BGBl. I Nr. 102/2002 idF BGBl. I Nr. 9/2011.

Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.

Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Behandlungspflichten von Abfällen – Abfallbehandlungspflichtenverordnung. BGBl. II Nr. 459/2004 idF BGBl. II Nr. 363/2006.

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von elektrischen und elektronischen Altgeräten - Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO). BGBl. II Nr. 121/2005 idF BGBl. II Nr. 166/2011.

Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Juni 2006 über die Verbringung von Abfällen.

Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leiterplatte aus einem Videorekorder mit elektronischen Bauelementen (Lee et al., 2012).....	14
Abbildung 2: Vergleich der Edelmetallkonzentration von Leiterplatten, EKG, Siedlungsabfällen und abgebauten Erzen (nach Rotter und Flamme, 2013).....	17
Abbildung 3: Vergleich des Aufkommens an EKG (links) und der Herkunft des insgesamt in EKG enthaltenen Goldes (rechts) (nach Chancerel und Rotter, 2009).....	19
Abbildung 4: Recyclingkette für Konsumgüter (*Die Metallausbeute der Kette bezieht sich auf ein Metall in einer bestimmten Produktgruppe.) (Hagelüken, 2010b)...	20
Abbildung 5: Aufteilung der KG-Behandlungsmenge auf Schadstoffentfrachtung mittels „manueller Demontage“ bzw. mittels „mechanischer Vorzerkleinerung + manueller Schadstoffseparation“, unterteilt in sozialökonomische (SÖB) und nicht sozialökonomische Betriebe (Tesar und Öhlinger, 2009).....	28
Abbildung 6: Das Konzentrationsdilemma bei der mechanischen Aufbereitung von EAG (Hagelüken, 2006 zit. nach Chancerel, 2010)	29
Abbildung 7: Darstellung von gezielt behandelten Leiterplatten durch maschinelles Abschleifen der elektronischen Bauelemente (Lee et al., 2012).....	32
Abbildung 8: Energieeinsparungspotentiale für Metalle beim Recycling von 1 Tonne Leiterplatten [Δ MJ/t Leiterplatten] (nach Wang und Gaustad, 2012)	36
Abbildung 9: Informelle Behandlung von EAG in Indien, Verbrennung von Kabeln (EMPA, 2009).....	37
Abbildung 10: Szenario 1 (links): Manuelle Demontage von PCs in Deutschland (Meskers und Hagelüken, 2009); Szenario 2 (rechts): Mechanische Aufbereitung von PCs in Deutschland (Meskers und Hagelüken, 2009).....	38
Abbildung 11: Szenario 3 (links): Optimiertes Schredderverfahren für kleine IKT-Geräte, Kupferhütte (Huisman et al., 2007); Szenario 4 (rechts): Shreddern eines gemischten Inputs an IKT-Geräten, integrierte Metallhütte (Chancerel et al., 2009).....	38
Abbildung 12: Szenario 5 (links): Informelle Behandlung von Leiterplatten in Indien (Keller, 2006; Rochat et al., 2007); Szenario 6 (rechts): Demontageversuch von PCs in China (Gmünder, 2007).....	38
Abbildung 13: Zusammensetzung der EKG-Sammelmengen nach Subkategorien (Huisman et al., 2007; *EAK, 2012)	42
Abbildung 14: Symbol für die getrennte Sammlung von EAG (EAG-VO)	43

Abbildung 15: Sammelbehälter für wertstoffreiche EKG und Informationsplakat am RH in Kufstein	45
Abbildung 16: Vergleich der EKG-Sammelmengen nach RH von 2010, 2011, 2012 und während des Sammelversuchs (*EAK, 2011 und 2012)	50
Abbildung 17: Zusammensetzung der EKG-Arten Wiens in Masse-% (nach KERP, 2011).....	52
Abbildung 18: Vergleich des Aufkommens an EKG und der Herkunft des insgesamt enthaltenen Goldes, Silbers und Palladiums	54
Abbildung 19: Abschätzung der Goldströme bei der konventionellen Behandlung von EAG und nach der getrennten Erfassung von 10 wertstoffreichen EKG-Arten (Oguchi et al., 2012).....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung von EKG, Anteile der Subkategorien und Beispiele für typische Gerätearten in der Gesamtmenge EAG Europas (nach Huisman et al., 2007).....	9
Tabelle 2: Materialzusammensetzung von EKG nach Gerätekategorien [Masse-%] (nach Freegard und Claes, 2009)	12
Tabelle 3: Materialzusammensetzung von EKG nach Gerätekategorien [Masse-%] (nach Dimitrakakisa et al., 2008).....	13
Tabelle 4: Edelmetallgehalte von unterschiedlichen EKG-Arten	16
Tabelle 5: Umsatzanteile von Materialien aus verschiedenen EAG-Arten (Blaser und Schluep, 2012).....	17
Tabelle 6: Nachfrage bei Metallen für Mobiltelefone, PCs und Laptops basierend auf den weltweiten Verkäufen 2007 (1200 Mio. Stück Mobiltelefone, 255 Mio. Stück PCs und Laptops) (Meskers und Hagelüken, 2008)	18
Tabelle 7: Abschätzung der Zusammensetzung und Wertanteile von Leiterplatten aus PCs (Richtwerte, Werte können innerhalb der Kategorie deutlich abweichen) (nach Meskers et al., 2009)	18
Tabelle 8: Städtevergleich hinsichtlich der EKG-Sammlung (Spitzbart et al., 2010) .	25
Tabelle 9: Gegenüberstellung der EAG-Mengenströme in den Niederlanden (nach Huisman et al., 2012)	27
Tabelle 10: Gemessene Edelmetallkonzentrationen in den Outputs "unshredded PCB", "preshredded PCB" und "shredded PCB" (Chancerel et al., 2009).....	30
Tabelle 11: Verteilung von Eisen, Kupfer, Silber, Gold und Palladium in den Outputfraktionen nach der EKG-Aufbereitung (nach Chancerel et al., 2008)	31
Tabelle 12: Grundinformationen über die am Sammelversuch teilnehmenden RH ..	40
Tabelle 13: Anteil wertstoffreicher EKG an der Gesamtsortiermasse (Sortierung vor dem Sammelversuch)	43
Tabelle 14: Untersuchung des Anteils der historischen EKG an der Gesamtsortiermasse (Sortierung vor dem Sammelversuch) (*EAK, 2012).....	44
Tabelle 15: Zusammenfassung des zusätzlichen Aufwands und der Umsetzung der getrennten Erfassung wertstoffreicher EKG auf den RH.....	47
Tabelle 16: Gesamtsortiermasse der wertstoffarmen Sammlung (=Zielfraktion) und Anteile der wertstoffreichen EKG (Sortierung während des Sammelversuchs) .	48

Tabelle 17: Gesamtsortiermasse der wertstoffreichen Sammlung (=Zielfraktion) und Anteile der wertstoffreichen EKG (Sortierung während des Sammelversuchs) .	49
Tabelle 18: Geräteanteile der Fehlwürfe der wertstoffreichen Sammlung (=Zielfraktion; Sortierung während des Sammelversuchs).....	49
Tabelle 19: Brutto- und Nettoanteile der wertstoffreichen EKG an der Gesamtsammelmasse im Sammelversuch bzw. Nettomengen der getrennt erfassten wertstoffreichen EKG	51
Tabelle 20: Abschätzung des Gehalts an Gold, Silber und Palladium von 1 Tonne EKG (*Salhofer, 2013)	53

Anhang

Informationsplakat für die BenutzerInnen des Sammelsystems

Sammelversuch zur Erfassung wertvoller Elektrokleingeräte

In einem gemeinsam mit der Universität für Bodenkultur (Institut für Abfallwirtschaft) durchgeführten wissenschaftlichen Sammelversuch (von 13.08. bis 10.12. 2012) wird untersucht, wie die getrennte Sammlung wertvoller Elektrokleingeräte auf Tiroler Recyclinghöfen umgesetzt werden kann.

Wertstoffreiche Geräte

Laptops, Mobiltelefone, DVD-Player, Computer, Drucker, Taschenrechner, USB-Sticks, MP3-Player und Ähnliches



Wertstoffärmere Geräte

Bügeleisen, Staubsauger, Mikrowellenherde, Wasserkocher, Toaster, Radios und Ähnliches



Teilnehmende Recyclinghöfe: AWZ Zillertal Mitte, Brixlegg, Kufstein, Mayrhofen-Brandberg, Thaur



Edelmetallgehalte aus Leiterplatten unterschiedlicher EKG-Arten

Geräteart (Herkunft der Leiterplatte)	Quelle	Gold [g/t]	Silber [g/t]	Palladium [g/t]
Audio- und Videogeräte	Angerer et al., 1993	31	674	
Batterieladegerät	Ernst et al., 2003	278		
Beamer	Sander et al., 2012		177	
Camcorder	Oguchi et al., 2011	530	5000	970
Digitalkamera	Chancerel, 2010	863	3057	42
	Oguchi et al., 2011	780	3200	200
Drucker	Huisman et al., 2007	47	350	9
	Oguchi et al., 2011	38	70	21
DVD-Player	Huisman et al., 2007	100	700	21
	Oguchi et al., 2011	150	710	20
Faxgerät	Oguchi et al., 2011	35	69	110
GPS	Ernst et al., 2003	536	5033	688
Kleine IKT-Geräte	Huisman et al., 2008	1300	5700	470
Minidisc Player	Oguchi et al., 2011	940	3400	550
Mobiltelefon	Ernst et al., 2003	368	3573	287
	Hagelüken und Buchert, 2008	980	5540	285
	Oguchi et al., 2011	1500	3800	300
	Yamame et al., 2011		2100	
Notebook	Oguchi et al., 2011	630	1100	200
Notebook-Festplatte	Buchert et al., 2012	400	2600	280
Notebook-Laufwerk	Buchert et al., 2012	200	2200	70
Notebook-Motherboard	Buchert et al., 2012	180	800	80
Notebook-Speicherkarte	Buchert et al., 2012	750	1650	180
PC	Angerer et al., 1993	81	905	
	Chatterjee und Kumar, 2009	280	450	
	Gmünder, 2007	225	1000	90
	Hagelüken, 2006	250	1000	110
	Huisman et al., 2008	230	1000	90
	Keller, 2006	156	775	99
	Kramer, 1994	300	600	
	Legarth et al., 1995	600	700	100
	Meskers et al., 2009	200	1000	90
	Oguchi et al., 2011	240	570	150
	William et al., 2007	220	810	
	Yamame et al., 2011	1300	1600	
Yu et al., 2009	230	600	100	
PC-CD Laufwerk	Gmünder, 2007	88	2203	52
PC-Diskettenlaufwerk	Gmünder, 2007	112	1500	203
PC-Festplatte	Gmünder, 2007	415	2630	286
PC-Netzgerät	Gmünder, 2007	10	373	17
Radio	Huisman et al., 2007	68	520	8
	Oguchi et al., 2011	26	170	34
Spielzeug	Huisman et al., 2007	89	365	18
Stereoanlage	Oguchi et al., 2011	6	57	
Tablet Computer	Sander et al., 2012	747	150	
Telefon	Ernst et al., 2003	50	2244	241
	Oguchi et al., 2011		2400	
Tragbarer CD-Player	Oguchi et al., 2011	370	3700	10
Tragbare Videospielekonsole	Chancerel, 2010	141	609	44
Videorekorder	Oguchi et al., 2011	23	210	50
	Lee et al., 2012	31	270	
Videospielekonsole	Oguchi et al., 2011	230	740	43

MASTERARBEIT
Sammelversuch zur getrennten Erfassung wertstoffreicher Elektrokleingeräte

Geräteart (Herkunft der Leiterplatte)	Quelle	Gold [g/t]	Silber [g/t]	Palladium [g/t]
Wertstoffreiche EKG	Chancerel, 2010	333		55
Wertstoffarme EKG	Chancerel, 2010	44	152	14