

# **Stoffstromanalyse und Modellierung von mechanischen Aufbereitungsprozessen für Elektro- und Elektronikaltgeräte**

**Perrine Chancerel, Susanne Rotter**

Technische Universität Berlin  
Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Abfallwirtschaft

## **Substance flow analysis and modelling of mechanical pre-processes for waste electrical and electronic equipments**

### **Abstract**

The aim of mechanical pre-processing of waste electrical and electronic equipment (WEEE) is to produce material fractions with an adequate quality for material recovery, energy recovery and disposal. A material flow analysis was carried out in two pre-processing plants, in order to depict the material and substance flows. This paper describes the methodological and practical approaches that were used to carry out the substance flow analysis, and how, based on the collected data, the processes were modelled.

### **Zusammenfassung**

Die mechanische Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten zielt hauptsächlich auf die Erzeugung von Materialfraktionen mit geeigneter Qualität für die anschließenden Verwertungs- und Entsorgungsprozesse ab. Zu den Aufgaben der Aufbereitung gehört sowohl die Wertstoffanreicherung in Fraktionen zur Verwertung als auch die Entfrachtung von Schad- und Störstoffen. In zwei unterschiedlichen Aufbereitungsanlagen für Elektro- und Elektronikaltgeräte wurden Stoffstromanalysen durchgeführt, um die Stoff- und Materialflüsse durch die Aufbereitungsprozesse bis hin zu den Outputs zu beschreiben. In diesem Beitrag wird erläutert, welche methodischen und praktischen Ansätze angewandt wurden, um Stoffstromanalysen von Aufbereitungsanlagen für Elektro- und Elektronikaltgeräten durchzuführen, und wie aus den erhobenen Daten die Prozesse modelliert wurden.

### **Keywords**

Elektro- und Elektronikaltgeräte, Aufbereitung, Stoffstromanalyse, Prozessmodellierung, Waste electrical and electronic equipment (WEEE), Pre-processing, Substance flow analysis, Material flow analysis, Process modelling

Aufgrund der zunehmenden Ressourcenknappheit und der Notwendigkeit, die Freisetzung von Schadstoffen aus menschlichen Aktivitäten in die Umwelt zu minimieren, kommt der Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten eine immer größere Bedeutung zu. Der hohe Wertstoffgehalt dieser Abfälle lässt erwarten, dass in diesem Bereich zukünftig neue ökonomische Anreize für einen Wandel der Abfallwirtschaft hin zur Ressourcenwirtschaft entstehen.

# 1 Mechanische Aufbereitung von Elektro(nik)altgeräten

## 1.1 Elektro- und Elektronikaltgeräte

Die Herstellung von Elektro- und Elektronikgeräten ist einer der am schnellsten wachsenden Industriesektoren. Ständige technische Innovationen führen zu einer stetigen Marktexpansion und gleichzeitig zur Verkürzung der Produktlebenszeiten elektrischer und elektronischer Geräte. Dies führt zu einer schnellen Zunahme des Aufkommens an Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG), die in den Abfallstrom gelangen. In Deutschland fällt derzeit jährlich eine Gesamtmenge von etwa 1,8 Millionen Tonnen EAG (BVSE, 1998) an.

Elektro- und Elektronikaltgeräte sind durch eine komplexe Mischung von Materialien und Bauteilen bis in den mikroskopischen Verbund gekennzeichnet. Neben rückgewinnbaren Wertstoffen wie Kunststoff, Eisen, Aluminium, Kupfer oder Gold enthalten diese Geräte auch relevante Konzentrationen an gesundheits- und umweltgefährdenden Stoffen, die bei einer nicht sachgemäßen Entsorgung freigesetzt werden können (MORF ET AL., 2004).

Als Reaktion auf die rasante Mengenentwicklung elektrischer und elektronischer Altgeräte, dem damit verbundenen Ressourcenverbrauch und der Umweltbelastung, hat das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union am 27. Januar 2003 die Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronikgeräte (WEEE – Waste Electric and Electronic Equipment) und die Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS - Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) verabschiedet. Mit dem Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (ELEKTROG) wurden diese Richtlinien 2005 in deutsches Recht umgesetzt.

Neben der Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten beinhaltet die Zielstellung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes insbesondere die getrennte Sammlung von durchschnittlich 4 kg Altgeräte aus privaten Haushalten pro Einwohner und Jahr. Die erfassten Geräte sollen einer Behandlung und Verwertung zugeführt werden, wobei je nach Gerätekategorie (z.B. Haushaltsgroßgeräte, Informations- und Telekommunikationsgeräte, Haushaltskleingeräte, Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte) Quoten der Verwertung, Wiederverwendung und stofflichen Verwertung zwischen 50 % und 80 % erfüllt werden müssen.

Das ElektroG setzt eine geteilte Herstellerverantwortung für Elektroaltgeräte um. Dabei ist der Aufbau herstellerindividueller Rücknahmesysteme möglich, spielt jedoch in der Praxis bislang keine große Rolle (CHANCEREL ET AL., 2007). Es ist davon auszugehen,

dass im Bereich der Kleingeräte ein größerer Anteil der Geräte derzeit noch über den Restabfall entsorgt wird. Aus Sortieranalysen ergeben sich durchschnittliche Gehalte von 0,8 bis 1,5 Gewichts-% für kleine Elektro- und Elektronikaltgeräten im Restabfall, was 0,7 bis 1,1 Kilogramm pro Einwohner und pro Jahr entspricht (ROTTER, JANZ, 2006).

## 1.2 Ziele der mechanischen Aufbereitung

Die mechanische Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten zielt hauptsächlich auf die Erzeugung von Materialfraktionen mit geeigneter Qualität für die anschließenden Verwertungs- und Entsorgungsprozesse ab. Für die Konzeption von Aufbereitungsanlagen sind unterschiedliche Technologien anwendbar (manuelle Schadstoffentfrachtung, Demontage, Zerkleinerung, automatisierte Sortiertechnologien etc.). Zu den Aufgaben der Aufbereitung gehört sowohl die Wertstoffanreicherung in Fraktionen zur Verwertung als auch die Entfrachtung von Schad- und Störstoffen, die anschließend den Vorschriften gemäß entsorgt werden müssen. Die Aufbereitungsprozesse bestimmen, welche Stoffe welchen Verwertungsprozessen bzw. Entsorgungswegen zugeführt werden und spielen deshalb eine große Rolle für die Rückgewinnung von Ressourcen.

## 2 Das Konzept Stoffstromanalyse

Ziel der Stoffstromanalyse ist es, vollständige und konsistente Daten über Ströme und Lagerbestände eines bestimmten Stoffs zu liefern (BRUNNER ET AL., 2004). Dies ist nicht nur auf Elementebene anwendbar, wenn der Massenerhaltungssatz gilt. Für organische Schadstoffe wie Dioxine, polybromierte Flammschutzmittel oder PCB wird auch der Zerstörungs- bzw. Bildungsgrad berücksichtigt.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden mehrere Schad- und Wertstoffströme untersucht, um ihre Flüsse durch die Aufbereitungsprozesse und ihren Verbleib in den Outputs zu beschreiben. Die ausgewählten Stoffe sollen repräsentativ für die Ziele und Schwierigkeiten der Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten sein. In diesem Sinn werden sowohl die Wertstoffe Kupfer, Eisen, Aluminium, Gold und Silber, als auch Schadstoffe wie Schwermetalle (Blei, Quecksilber und Cadmium) betrachtet.

In der Studie von MORF ET AL. (2004) wurde bereits der Ansatz der Stoffflussanalyse gewählt. Die Verteilung der Stoffe aus dem Inputmaterial einer Entsorgungsanlage für Elektro- und Elektronikkleingeräteschrott in die Outputprodukte wurde experimentell ermittelt. Diese Stoffflussanalyse erlaubte eine ganzheitliche Darstellung des untersuchten Prozesses, anhand derer Optimierungspotenziale des Verarbeitungsprozesses erkannt und für betriebliche und abfallwirtschaftliche Entscheidungen genutzt werden können. REUTER ET AL. (2005) berichtet über eine Stoffstromanalyse der Verwertung von

1153 Altfahrzeugen. Der methodische Ansatz und die praktische Vorgehensweise lassen sich von den Fahrzeugen auf die Altgeräte übertragen.

Die vorliegende Untersuchung liefert Daten über weitere Aufbereitungsprozesse und konzentriert sich auf Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik und der Unterhaltungselektronik.

### **3 Experimentelle Durchführung der Stoffstromanalyse**

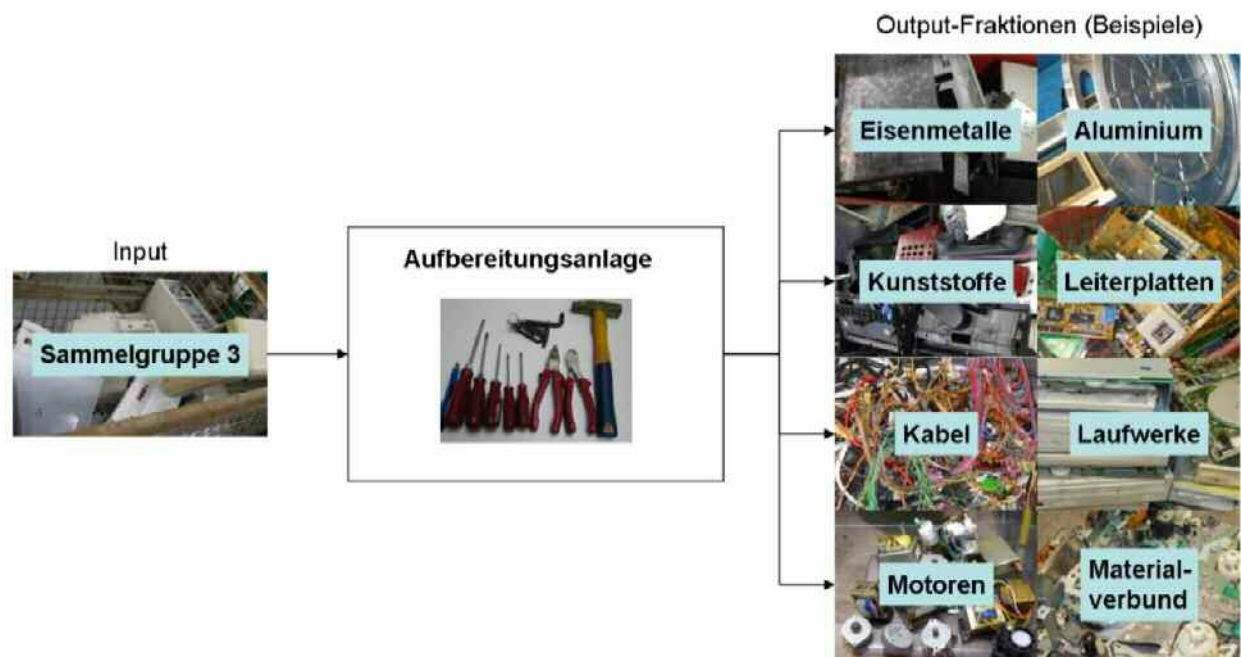
#### **3.1 Systemgrenze**

Die Definition der Grenzen der Untersuchung umfasst folgende fünf Aspekte: (1) zeitliche Grenze, (2) örtliche Grenze, (3) Wahl der Prozesse, (4) Wahl der Güter und (5) Wahl der Stoffe (MORF ET AL., 2004).

Die zeitliche Grenze war in der vorliegenden Studie der Zeitpunkt (Januar 2008) und die Länge der Untersuchung (5 bis 10 Stunden). Die örtliche Grenze ist Deutschland, als Herkunftsland der Altgeräte. Es wird angenommen, dass die für die Stoffstromanalyse betrachteten Altgeräte repräsentativ für die Anfang 2008 angefallenden Altgeräte in Deutschland Anfang sind. Als Prozesse werden zwei unterschiedliche Aufbereitungsanlagen gewählt. Betrachtet wurden Geräte der Sammelgruppe 3 laut ElektroG: Informations- und Telekommunikationstechnik (Kategorie 3 laut ElektroG) und Unterhaltungselektronik (Kategorie 4), wobei Fernseh- und Computermonitore ausgeschlossen wurden. Der Verbleib von Metallen (Basismetalle wie Aluminium und Kupfer, Schwermetalle wie Blei und Cadmium, Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium) wurde betrachtet.

#### **3.2 Methode zur Durchführung der Analyse**

Abbildung 1 zeigt die Materialfraktionen, die als Output einer beispielhaften Aufbereitungsanlage für Elektro- und Elektronikaltgeräte erzeugt werden. Der Aufbereitungsprozess wird als „Black Box“ betrachtet.



**Abbildung 1** Input und Output einer Aufbereitungsanlage für Elektro(nik)altgeräte

Bei der Stoffstromanalyse werden für jede Fraktion (sowohl Input als auch Outputs) folgende Daten erhoben:

- Masse der Fraktion (Wägung)
- Qualitative Beschreibung (äußere Erscheinung, „Untergruppen“, enthaltene Materialien, Farbe etc.)
- Quantitative Untersuchung (Stückzahl, Masse der „Untergruppen“, Masse der verschiedenen Materialien, ggf. analytische Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Fraktion)

Unter „Untergruppen“ werden verschiedene Bestandteile der Fraktionen verstanden. Zum Beispiel besteht der Input aus Altgeräten, die man nach Gerätetyp und Gerätekategorie zuordnen kann. Auch die Outputfraktionen können in homogenere Untergruppen geteilt werden. Beispielweise kann man die externen Kabel von den dünnen internen Kabeln unterscheiden, oder in der Outputfraktion „Eisenmetalle“ kann man die Störstoffe (Kleber, kleine Kunststoff- und Gummiteile, kleine Stücke von Nicht-Eisen-Metallen) trennen und separat wiegen. In der Kunststoff-Fraktion wurden die Kunststoffteile je nach Kunststoffart sortiert. Die Untergliederung dient einer genaueren quantifizierten Beschreibung der Fraktionen.

Zwei Anlagen wurden mit der gleichen Methode untersucht. In der einen Anlage werden die Altgeräte manuell demontiert, während in der anderen Anlage hauptsächlich automatisierte Verfahren angewandt werden.

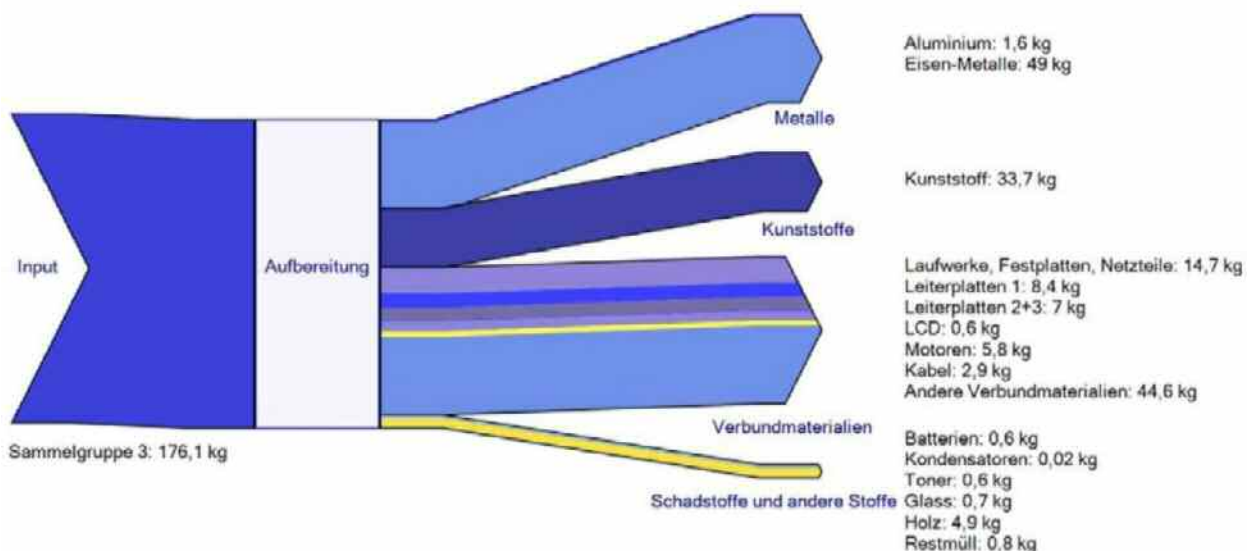
## 4 Auswertung der Ergebnisse

Zur Auswertung der Daten wird die kostenlose Software STAN benutzt. STAN (kurz für SToffflussANalyse) wurde von der Technische Universität Wien entwickelt und ermöglicht, Güter- und Stoffflussanalysen durchzuführen. Die Software verwendet mathematisch-statistische Werkzeuge wie Datenausgleichsrechnung und Fehlerfortpflanzung, um Datenunsicherheiten zu berücksichtigen (mehr Informationen unter [www.iwa.tuwien.ac.at](http://www.iwa.tuwien.ac.at)).

### 4.1 Massenbilanz

In diesem Beitrag wird eine Untersuchung erläutert, in der 171 kg von Altgeräten der Sammelgruppe 3 nach ElektroG manuell demontiert wurden. Der Input beinhaltete Computer, Drucker, DVD-Player, Telefone, etc.

Als erste Auswertung der erfassten Daten wurde eine einfache Massenbilanz erstellt (Abbildung 2).



**Abbildung 2** Massenbilanz des manuellen Aufbereitungsprozesses von Elektro- und Elektronikaltgeräten der Sammelgruppe 3

Die Massenbilanz zeigt, dass die Fraktion der Eisenmetalle 28 Gew.-% und die Kunststofffraktionen (größere Kunststoffstücke) 19 Gew.-% des Outputs ausmachen. Eine weitere wichtige Fraktion bilden die Verbundmaterialien (24%). Die Schadstoffe Batterien, Kondensatoren und Toner sind mit 0,7 Gew.-% vorhanden.

Dabei ist zu beachten, dass die Fraktionen nicht rein sind. In der Kunststofffraktion befinden sich beispielsweise kleine Metallteile, die übersehen worden sind oder die so eng mit dem Kunststoff verbunden sind, dass sie nicht getrennt werden konnten.

## 4.2 Stoffstromanalyse am Beispiel Kupfer und Gold

Zur Analyse der Stoffströme werden Angaben über die Konzentration des untersuchten Stoffs in allen Outputfraktionen benötigt. Diese Daten kommen aus (1) der Literatur, (2) der analytischen Bestimmung der chemischen Zusammensetzung oder aus (3) Abschätzungen.

Zur systematischen Organisation der Daten bezüglich der Charakteristiken der Altgeräte und deren Bauteile wurde eine Datenbank aufgebaut, die sowohl Daten aus Veröffentlichungen als auch Daten aus eigenen Untersuchungen beinhaltet. Neben der Zusammensetzung der Altgeräte erfasst die Datenbank u.a. Analysenergebnisse aus der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Bauteilen (CHANCEREL, ROTTER, 2007). Stehen mehrere Analysenergebnisse von vergleichbaren Bauteilen (z.B. Leiterplatten aus Computer) zur Verfügung, wird der Median der Ergebnisse für die Stoffstromanalyse genutzt.

Die genaueste und aufwendigste Methode, um die Konzentration des untersuchten Stoffes in den Outputfraktionen zu bestimmen, besteht darin, chemische Analysen durchzuführen. Für Metalle kommen mehrere Analytikmethoden in Frage, wie zum Beispiel Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) oder Emissionsspektroskopie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP).

Möglich ist außerdem eine Abschätzung der Konzentration an bestimmten Stoffen durch Sortieranalyse und/oder visuelle Abschätzung.

Im Allgemeinen wird die Masse der Stoffe in den Outputfraktionen berechnet, indem die Masse der Output-Fraktionen mit der Konzentration am Stoff in der Fraktion multipliziert wird. Die Konzentrationen an Kupfer und Gold der Output-Fraktionen, die für die Auswertung der Daten angenommen wurden, stellt Tabelle 1 dar. Diese Werte sind natürlich mit Unsicherheiten verbunden. Der Gehalt des Inputs an Kupfer (Gold) wird als Summe der Gehalt an Kupfer (Gold) der Outputfraktionen berechnet.

**Tabelle 1** Kupfer- und Gold-Konzentration in den Output-Fraktionen der Aufbereitungsanlage

Output-Fraktionen	Konzentration Kupfer (ppm)	Annahme basierend auf den Daten von	Konzentration Gold (ppm)	Annahme basierend auf den Daten von
Aluminium	0	Eigene Annahme	0	Eigene Annahme
Batterien	25000	BAUMANN ET AL., 1993	0	Eigene Annahme
CD-Laufwerke	12000	1)	15	1)
Diskettenlaufwerke	38000	1)	10	1)
Eisen-Metalle	2200	DEFRA, 2006	0	Eigene Annahme

Output-Fractionen	Konzentration Kupfer (ppm)	Annahme basierend auf den Daten von	Konzentration Gold (ppm)	Annahme basierend auf den Daten von
Festplatten	62000	1)	60	1)
Glass	0	Eigene Annahme	0	Eigene Annahme
Holz	0	Eigene Annahme	0	Eigene Annahme
Kabel	350000	OEKOPOL, 2004	0	Eigene Annahme
Kondensatoren	43500	WICHMANN ET AL., 2002	0	WICHMANN ET AL., 2002
Kunststoffe	2800	DEFRA, 2006	3	2)
LCD	4300	MÜLLER, 2005	0	Eigene Annahme
Leiterplatten 1 (hochwertige Leiterplatten)	200000	HAGELÜKEN, 2007	250	HAGELÜKEN, 2007
Leiterplatten 2+3 (minderwertige Leiterplatten)	210000	HUISMAN ET AL., 2007	50	Annahme basierend auf mehreren Literaturquellen
Motor	250000	DEFRA, 2004	0	Eigene Annahme
Mischschrott	10000	Eigene Annahme	3	2)
Computer-Netzteile	70000	1)	10	1)
Processor	109500	WICHMANN ET AL., 2002	315	WICHMANN ET AL., 2002
Restmüll	0	Visuelle Abschätzung	0	Eigene Annahme
Tastaturen	28000	1)	5	1)
Toner	2800	Annahme: wie Kunststoff	0	Eigene Annahme

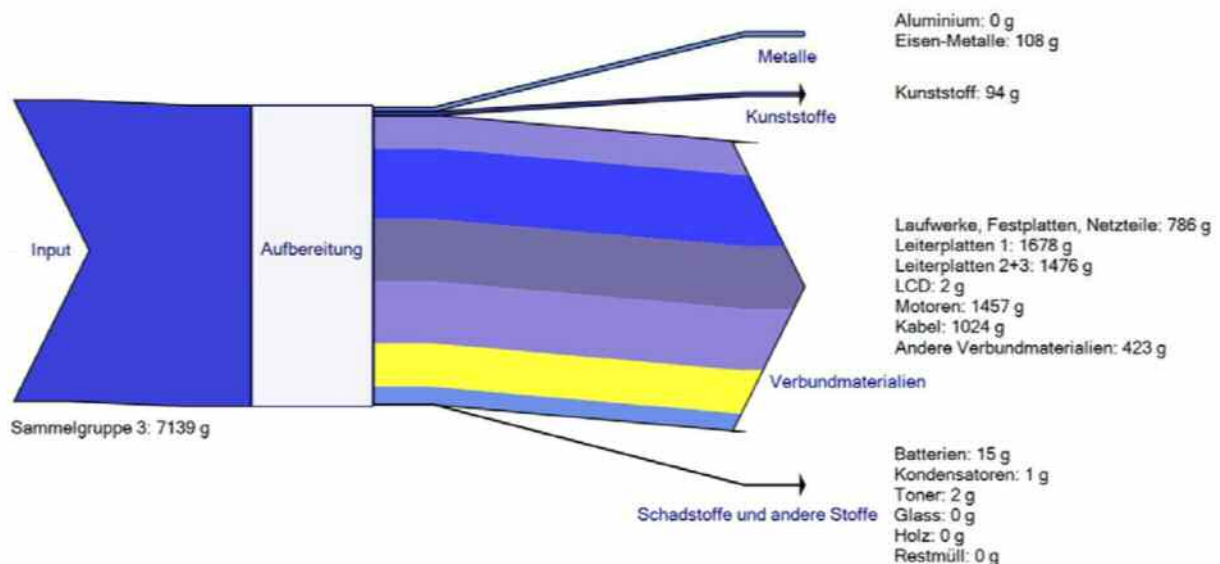
1) Bestimmung durch eigene Demontageuntersuchung und die in Tabelle 1 angegebenen Konzentration von Leiterplatten und Kabeln an Kupfer und Gold

2) Annahme aufgrund der Anwesenheit von wenigen Leiterplatten in der Kunststofffraktion

### Kupfer

Für alle Output-Fractionen werden die in Tabelle 1 dargestellten Gehalte an Kupfer angenommen. Abbildung 3 stellt die Massenbilanz für Kupfer dar.



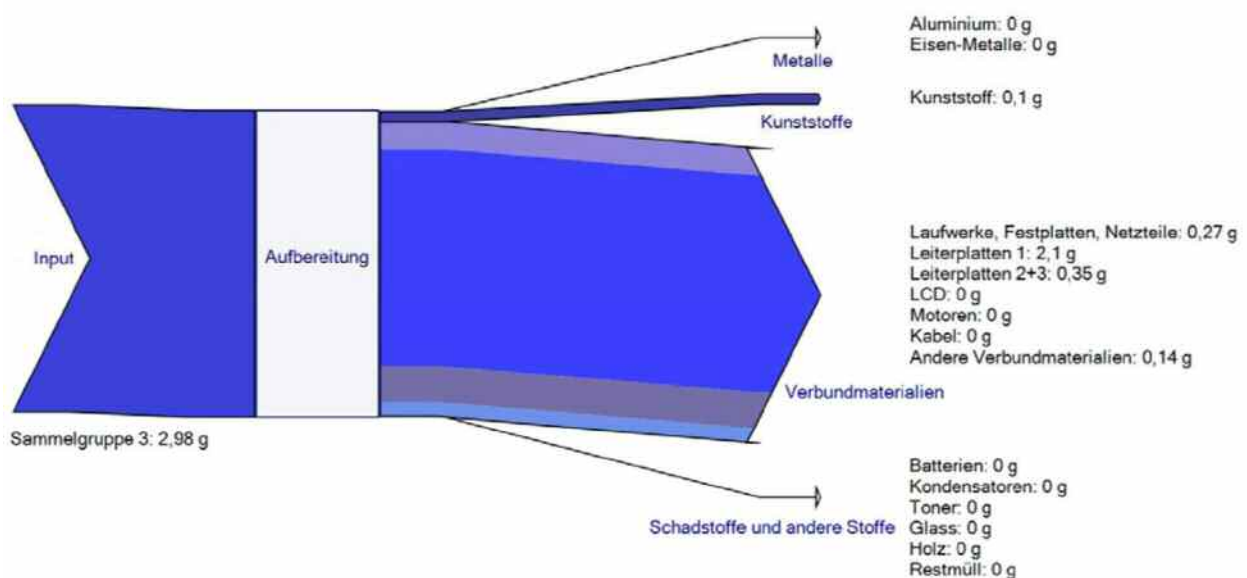


**Abbildung 3** Massenbilanz von Kupfer im manuellen Aufbereitungsprozess

Abbildung 3 zeigt, dass es etwas mehr als 7 kg von Kupfer in den untersuchten Altgeräten gab. Nach der Aufbereitung wurde das Kupfer Verbundmaterialien wie hauptsächlich Leiterplatten, Motoren und Kabel zugeteilt. Die Rückgewinnung des Kupfers setzt voraus, dass nachgeschaltete Prozesse das Kupfer aus den Verbundmaterialien trennen.

## Gold

Durch den gleichen methodischen Ansatz wie bei Kupfer wird Abbildung 4 erstellt.



**Abbildung 4** Massenbilanz von Gold im manuellen Aufbereitungsprozess

Wie im Fall von Kupfer wird festgestellt, dass das Gold in den Verbundmaterialien zu finden ist. Dabei spielen die hochwertigen Leiterplatten (Leiterplatten 1) die größte Rolle. 70 Gew.-% des gesamten Golds befinden sich in dieser Outputfraktion.

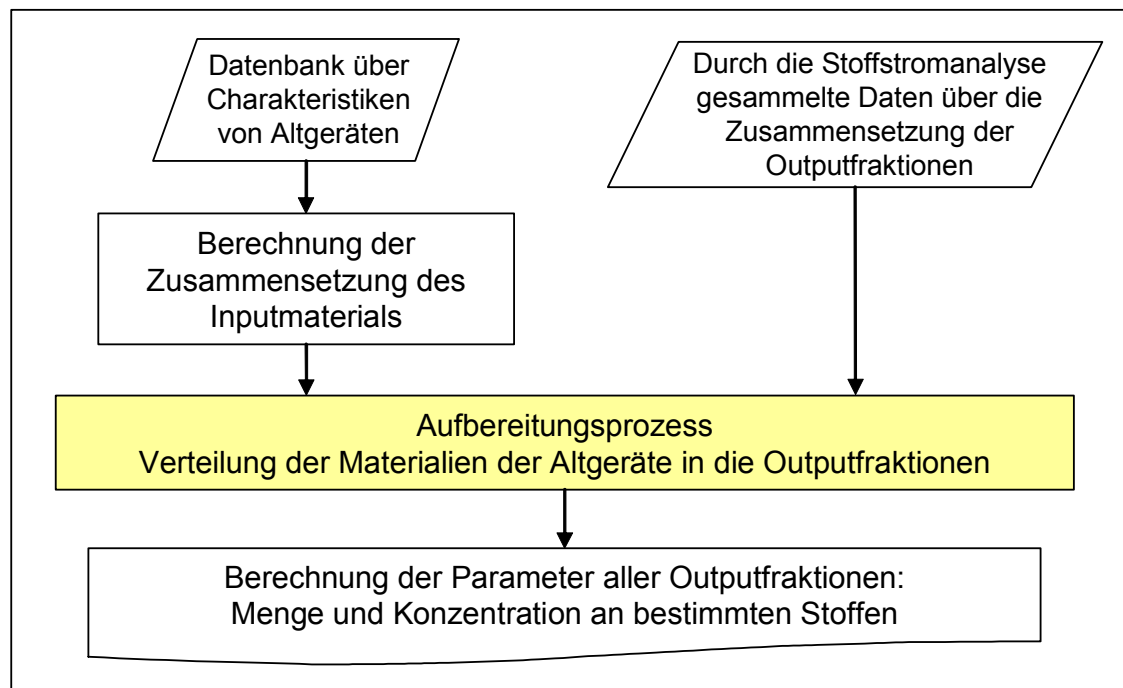
In wieweit das Gold zurück gewonnen wird, hängt davon ab, zu welchen nach der Aufbereitung angeschlossenen Verwertungsprozessen die einzelnen Outputfraktionen geführt werden. Basierend auf der Stoffstromanalyse können Optimierungspotenziale identifiziert werden, um die Menge der durch die gesamte Prozesskette zurück gewonnenen Metalle zu erhöhen. Der mit der Gewinnung von zusätzlichen Ressourcen verbundene Aufwand muss im Vergleich zur Menge an zusätzlich zurück gewonnenen Ressourcen nicht unverhältnismäßig sein.

## 5 Von der Stoffstromanalyse zur Prozessmodellierung

Mit der gleichen Methode wurde eine automatisierte Aufbereitungsanlage untersucht. Die Daten aus der Stoffstromanalyse dienen als Wissensbasis für eine anschließende Prozessmodellierung. Ziel der Modellierung ist es, den Einfluss von Veränderungen der Inputeigenschaften auf die Verteilung der Stoff- und Materialflüsse abzubilden.

Durch die Stoffstromanalyse werden Informationen über die Menge und Zusammensetzung der Outputfraktionen von verschiedenen Aufbereitungsprozessen gesammelt. Für ein ähnliches Inputmaterial (in diesem Fall Altgeräte der Sammelgruppe 3) haben die untersuchten Aufbereitungsprozesse eine unterschiedliche Anzahl von Outputfraktionen mit unterschiedlicher Qualität geliefert. Die qualitative und quantitative Untersuchung der Outputfraktionen haben ermöglicht, die Qualität der Outputfraktionen je nach angewandtem Prozess zu beschreiben.

Die Eigenschaften des Inputmaterials werden aus einer Datenbank über Charakteristiken von Elektro(nik)altgeräten aufgerufen (CHANCEREL, ROTTER, 2007). Die Verknüpfung mit der Datenbank ermöglicht die Abbildung der Effekte von Variationen der Eigenschaften des Inputs. Durch die Stoffstromanalyse wurde beschrieben, wie die in den Altgeräten enthaltenen Materialien je nach Aufbereitungsprozess in die Outputfraktionen verteilt werden. Basierend auf diesen Daten berechnet das Modell die Menge und die Konzentration an untersuchten Stoffen aller Outputfraktionen je nach Charakteristiken des Inputs. Abbildung 5 zeigt, wie die gesammelten Informationen in die Modellierung der Prozesse integriert werden. Zur Entwicklung des Modells werden die Software MatLab und Simulink genutzt.



**Abbildung 5** Massenbilanz von Gold im manuellen Aufbereitungsprozess

Mit dieser Methode können für verschiedene Mischungen von Altgeräten die Auswirkungen der beiden untersuchten Aufbereitungsprozesse auf die Verteilung der Stoffe modelliert werden. Durch Extrapolation der experimentellen Daten wird zukünftig die Modellierung auf weitere Aufbereitungsprozesse erweitert.

Die Untersuchungen liefern neue praxisorientierte Ansätze für die Modellierung von Aufbereitungsprozessen aus experimentellen Daten. Der Nutzen von Stoffflussanalysen für ressourcenrelevante Fragestellungen wird hier am Beispiel der Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten gezeigt. Die angewendete Methode ist über das Beispiel der Elektro- und Elektronikaltgeräte hinaus auf andere Abfallarten übertragbar.

**Danksagung:** Die Autorinnen bedanken sich bei dem Werkstatt Frankfurt e.V. für die Zusammenarbeit. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert dieses Forschungsprojekt im Rahmen des Stipendienprogramms.

## Literatur

- |  |      |  |
|--|------|--|
| Baumann W.; Muth A.;                                       | 1993 | Abfallverhalten neuartiger Batterien - Mengen, Inhaltsstoffe, Verwertungs- und Behandlungsmethoden von Batterien. Umweltbundesamt, Forschungsbericht 103 10 610, Texte 36/93. Berlin |
| Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (BVSE) | 1998 | Elektronikschrottreycling – Fakten, Zahlen und Verfahren. Informationsschrift der bvse-recyconsult GmbH. Bonn  |

- Chancerel, P.; Rotter, V.S.; 2007 Recycling oriented characterisation of WEEE. Proceedings of Eco-X conference 2007, Wien, Österreich, S. 205-212
- Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) 2004 WEEE & Hazardous Waste. AEA Technology commissioned by DEFRA. Oxfordshire, United Kingdom
- Hagelüken, C.; van Kerckhoven, T.; 2007 Improving resource recovery from electronic scrap recycling - an holistic approach. Proceedings of Eco-X conference, Wien
- Huisman, J. et al.; 2007 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) (Final Report). Bonn
- Morf, L.; Taverna, R.; 2004 Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott – Stoffflussanalyse. Schriftenreihe Umwelt Nr. 374, Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Reuter, M.A.; Boin, U.M.J.; van Schaik A.; Verhoef, E.; Heiskanen, K.; Yang, Y.; Georgalli, G.; 2005 The metrics of material and metal ecology: harmonizing the resource, technology and environmental cycles. Elsevier Science, Amsterdam, ISBN 0-444-51137-7.
- Rotter, S.; Janz, A.; 2006 Charakterisierung elektrischer und elektronischer Altgeräte (EAG) - 1. Teil: Mengenprognosen und und Zusammensetzung von Kleingeräten. Müll und Abfall 7, S. 365-373.
- Wichmann, H., Sprenger, R., Dettmer, F.T., Schmidt-Nädler, C. Bahadir, M.: 2002 Wert- und Schadstoffpotentiale von elektronischen Bauteilen. Verein Deutscher Ingenieure, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15 Nr. 239, Düsseldorf

**Anschrift der Verfasserinnen:**

Perrine Chancerel, Vera Susanne Rotter  
 Technische Universität Berlin  
 Institut für Technischen Umweltschutz, Fachgebiet Abfallwirtschaft  
 Sekr. Z2  
 Straße des 17. Juni 135  
 D-10623 Berlin  
 Telefon +49 30 314 79250  
 Email: [chancerel@ut.tu-berlin.de](mailto:chancerel@ut.tu-berlin.de)  
 Website: [itu107.ut.tu-berlin.de/naw](http://itu107.ut.tu-berlin.de/naw)