

Elektrodynamische Fragmentierung von Elektroschrott

Elektrodynamische Fragmentierung, Recycling, Elektroschrott

C. Iseli & M. Streicher-Porte

Fachhochschule Nordwestschweiz, Zentrum für Ressourceneffizienz ZEF, Windisch, Schweiz

R. Martino & S. Gaydardzhiev

University of Liège, GeMME, Liège, Belgien

A. Weh

Selfrag AG, Application development, Kerzers, Schweiz

KURZFASSUNG: Durch den Einsatz von elektrodynamischer Fragmentierung (EDF) ist es nicht nötig, Material fein zu mahlen, es kann vielmehr durch seine selektive Auftrennung aufgeschlossen werden. Es konnte gezeigt werden, dass EDF fähig ist, Metall-/Plastik Verbunde aufzutrennen. Diese Eigenschaft stellt für Recycling von Elektroschrott eine gewünschte Verbesserung dar. Untersuchungen dazu werden in diesem Bericht am Beispiel von WEEE und speziell an Leiterplatten aufgezeigt.

Die Versuche zeigen, dass EDF für verschiedenste Arten von Elektroschrott eingesetzt werden kann. Verschweisste Kompaktgeräte können zum Beispiel so weit geöffnet werden, dass die gewünschte Komponente freigelegt und entfernt werden kann.

Leiterplatten haben die Eigenschaft, dass bei kontinuierlich steigendem Energieeintrag zuerst die aufgetragenen Komponenten abgetrennt werden, bevor die Cu-Bahnen freigelegt werden. Bei noch höherem Energieeintrag wird die Leiterplatte schlussendlich zerkleinert und vollständig zerstört. Durch diese Entfrachtung der Leiterplatte kann ein metallreiches Konzentrat hergestellt werden.

1 EINLEITUNG

Steigende Energiepreise und die sinkende Verfügbarkeit von Primärressourcen haben zur Folge, dass die Rohstoffgewinnung effizienter gestaltet werden muss. Sekundärressourcen werden deshalb in Zukunft immer wichtiger. Eine solche "urbane Mine" stellen Verbundmaterialien, sogenannte WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), dar. Die Schnelllebigkeit unserer Gesellschaft führt dazu, dass bestimmte Abfallströme von WEEE in Zukunft ansteigen, da die Technologie von Elektronikgeräten schnell veraltet und deshalb rasch ersetzt wird. Möglichkeiten, um diesem steigendem Abfallstrom entgegen zu wirken, sind eine Erhöhung der Lebensdauer oder ein verbessertes Recycling. Die Realität sieht heute aber anders aus: Immer mehr Geräte sind verschweisst, sodass sie nicht mehr geöffnet werden können. Dies hat zur Folge, dass Geräte bei einem Defekt einzelner Komponenten nicht repariert werden können und entsorgt werden müssen. Solche Geräte werden zudem immer kompakter und komplexer, sie enthalten oft bis zu 60 verschiedene Elemente (UNEP 2009). All dies erschwert das noch ohnehin wenig erforschte Recycling dieses Abfallstromes.

EDF ist eine innovative Zerkleinerungstechnologie, welche Materialien selektiv aufschliessen kann. Dabei wird eine Hochspannungsentladung durch das zu behandelnde Material erzwungen. Der dadurch erzeugte Plasmakanal breitet sich entlang von Phasengrenzen verschiedener Materialien aus. Der Plasmakanal hat extrem hohe Druck- und Temperaturanstiege zur Folge, was zu einer selektiven Auftrennung des Materials führt, ohne dass dieses unnötig zerkleinert wird.

Es wurde getestet, wie gut sich diese Technologie für die Freilegung von Wertstoffen in Elektroschrott eignet. Das Ziel für das Anwenden von EDF ist, eine an Wertstoffen angereicherte Fraktion zu erhalten.

2 VORGEHEN UND RESULTATE

Für die Versuche wurde eine batchweise betriebene Anlage der Firma SELFRAG verwendet. Da es sich um eine Laboranlage handelt, konnten nur kleine Probenmengen prozessiert werden. Ein Vergleich mit einer kontinuierlichen Industrieanlage wird an dieser Stelle nicht gemacht. Veränderbare Prozessparameter sind folgende: Spannung (90-200kV), Elektrodenabstand (10-40mm), Frequenz (1-5Hz) und die Anzahl der Entladungen.

Alle verwendeten Materialien stammen von einem Schweizer Recyclingbetrieb.

Es geht in den folgenden Abschnitten darum, aufzuzeigen, ob sich die verschiedenen Materialien für eine Behandlung durch EDF eignen.

2.1 *Machbarkeitsstudie Elektroschrott*

Verschiedene WEEE, welche einer Optimierung im Recyclingprozess bedürfen, wurden ausgewählt um Vortests durchzuführen. Das Ziel war die Identifikation jener Stoffströme, welche sich für eine Behandlung mittels EDF eignen. Eine der gesetzlichen Mindestanforderungen an die Entsorgung von WEEE ist das Entfernen von Batterien/Akkumulatoren und schadstoffhaltigen Kondensatoren (Art. 6 VREG). Deshalb ist die zur Beurteilung herangezogene Eigenschaft, die Fähigkeit, einen Metall- / Plastikverbund aufzulösen und die jeweils gewünschte Komponente freizulegen.

Neben den bisherigen Abfallströmen wie Computer, Stecker, Elektromotoren wurden auch künftig anfallende Kompaktgeräte wie Mobiltelefone, Datenlogger und andere untersucht.

In diesen Vorversuchen konnte bestätigt werden, dass sich EDF eignet, um solche Verbundmaterialien aufzutrennen. Gehäuse von Smartphones und anderen Kompaktgeräte konnten so weit geöffnet werden, dass verbaute Batterien resp. Akkus freigelegt wurden.

Bei Leiterplatten wurde festgestellt, dass durch den Einsatz von EDF die aufgelöteten Komponenten entfernt werden können. Diese Eigenschaft im nächsten Abschnitt vertiefter untersucht.

Verschraubte oder (metallisch)geschweisste Verbindungen (z.B. Harddisk, Kühlkörper, usw.) können nicht mittels EDF aufgetrennt werden.

2.2 *Leiterplatten*

Charakteristisch für Leiterplatten sind hohe Wertstoffkonzentrationen, aber auch eine hohe Heterogenität. Auf einer Leiterplatte sind viele unterschiedliche Komponenten angebracht: Anschlüsse, Kontakte, Kondensatoren, Chips, Prozessoren, Kühlkörper, usw. Diese Komponenten bestehen hauptsächlich aus Metall. Das Board der Leiterplatten hingegen besteht aus einem Epoxidharz. In Versuchen konnte beobachtet werden, dass darin 4-6 leitende Kupferbahnen eingebettet sind. Folglich ist der Grossteil der wertvollen Metalle in den Komponenten zu finden, wobei Cu angereichert in den Leiterplatten zurückbleiben wird. Um dieses Verhalten zu verifizieren, werden Analysen des Metallgehalts anhand folgender Metalle durchgeführt: Cu, Au, Ag, Pd und Pt.

Die Herkunft der Leiterplatten hat einen grossen Einfluss auf den absoluten Metallgehalt. Leiterplatten aus Mobiltelefonen enthalten bis zu 20 verschiedene Metalle, welche 35-40 % des Gewichts ausmachen (Wu et al. 2008). Leiterplatten aus einem Computer enthalten 20.2 % Cu, wobei Leiterplatten aus Mobiltelefonen 34.5% Cu enthalten (Yamane et al. 2011).

Folgende Metallgehalte können von Leiterplatten erwartet werden: 26.8 % Cu, 80 ppm Au, 3300 ppm Ag (Cui & Zhang 2008).

Für die Versuche wurden high-grade Leiterplatten aus einem Computer sorgfältig mittels Wasserstrahl zu Stücken à 4x4 cm zerkleinert. Dies war eine optimale Grösse um sie mit der SELFRAG LAB zu behandeln und garantierte konstante Prozessparameter. Diese Fragmente wurden batchweise, mit immer steigendem Energieeintrag behandelt. Es wurde festgestellt, dass durch den Einsatz von EDF, zuerst die Komponenten von der Leiterplatte abgetrennt werden (Stufe 1). Mit steigendem Energieeintrag wurden anschliessend die Kupferbahnen aufgetrennt (Stufe 2) bevor dann eine starke Zerkleinerung und Zerstörung des Boards eintrat (Stufe 3). Die Beurteilung

dieser Zustände wird visuell vorgenommen. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden gleiche Leiterplattenfragmente mit einer Hammermühle auf < 10 mm gemahlen.

Prozessparameter: Für Stufe 1&2 wurden 12 Fragmente und für Stufen 3 je 15 Fragmente à 4x4 cm gleichzeitig prozessiert. Damit wird sichergestellt, dass die Prozesszone ausreichend befüllt ist und so die Entladung über die Leiterplatten geschieht.

Die weiteren Prozessparameter sind folgende: Spannung 150 kV für Stufe 1 resp. 180 kV für Stufe 2&3, Frequenz 5 Hz, Elektrodenabstand 40mm.

Das Prozesswasser wird nach dem Prozess jeweils gefiltert, um daraus die sog. Feinfraktion zu gewinnen. Einige Stoffe waren danach immer noch im Prozesswasser gelöst. Dadurch stieg dessen Leitfähigkeit kontinuierlich an, was dazu führte, dass der Prozess gehemmt wurde und das Prozesswasser ausgetauscht werden musste. Da für die Laboranwendung keine Wasseraufbereitung zur Verfügung stand, war der Wasserverbrauch relativ hoch. Bei einem grosstechnischen Einsatz von EDF würde das Prozesswasser so weit aufbereitet werden, dass es im Kreislauf geführt werden kann.

Tab. 1: Zusammenfassung der Versuche (Stufe 1: Entfernen der Komponenten; Stufe 2: Auftrennen der Kupferschichten in der Platte; Stufe 3: Zerkleinerung und Zerstörung des Boards)

Stufe	1	2	3
Energieverbrauch* [kWh/t]	68	540	1184
Input	Fragmente einer intakten Leiterplatte	Fragmente ohne Komponenten aus Stufe 1	Fragmente ohne Komponenten aus Stufe 1
Output	- Fragmente ohne Komponenten - Komponenten - Feinfraktion - Prozesswasser	- leicht zerkleinerte Fragmente mit aufgeschlossener Cu-Leiterbahn - Feinfraktion - Prozesswasser	- stark zerkleinerte Fragmente - Feinfraktion - Prozesswasser

*Der Energieverbrauch wurde am Display der SELFRAG LAB abgelesen und ist Materialabhängig. Der verwendete Batch-Prozess braucht mehr Energie als eine kontinuierliche Anlage (Selfrag - Persönliche Mitteilung).

Es wurde die Partikelgrößenverteilung der behandelten Leiterplatten analysiert. Es zeigt sich, dass Stufe 2 wesentlich mehr intakte 4x4 cm Fragmente enthält als Stufe 3. Das bedeutet, dass bei Stufe 2 hauptsächlich die Freilegung der leitenden Cu-Schichten stattfindet, ohne das Board unnötig zu zerkleinern. Das entspricht dem gewünschten Zustand.

Leachingversuche ergaben, dass EDF behandelte Leiterplatten der Stufe 2 denselben Kupferfreisetzungsgrad aufweisen, wie die mit einer herkömmlichen Hammermühle < 10 mm zerkleinerten. Der Unterschied liegt aber darin, dass die Leiterplatten der EDF Stufe 2 diesen Freisetzungsgrad erreichen, ohne dass die Leiterplatten stark zerkleinert werden müssen.

Eine Behandlung der Leiterplatten nach EDF Stufe 3 bringt einen enormen Energieaufwand mit sich, weshalb Stufe 3 im aktuellen Projekt nicht weiter vertieft wird.

Durch das Abtrennen der Komponenten auf der Leiterplatte kann eine Komponentenfraktion mit hoher Konzentration an Ag, Au und Pd erzeugt werden. In den unbestückten Leiterplatten wird die Konzentration an Cu erhöht. Wie stark diese Aufkonzentrierung und damit die Wertsteigerung ist, wird noch untersucht. Durch weitere mechanische Sortierung könnten verbleibende, wertmindernde Stoffe wie z. B. Plastik, Al-Kühlkörper oder andere NE-Metalle abgetrennt werden, wodurch der Wert dieses Metallkonzentrats zusätzlich erhöht würde.

Erste Analysen zeigen, dass die Feinfraktion zwar relativ leicht ist, aber einen sehr hohen Metallgehalt an Cu, Au, Ag und Pd aufweist. Es wird vermutet, dass oberflächliche Kontakte durch EDF leicht abgetrennt werden und ins Prozesswasser gelangen. Diese Feinfraktion kann durch Filtration aus dem Prozesswasser isoliert werden.

Analysen des Prozesswassers zeigten, dass sich keine organischen Stoffe darin anreichern. Vorstellbar ist, dass sich, bei einer Kreislaufführung des Prozesswassers, organische Komponenten im Wasser anreichern. Mögliche solcher Quellen sind Elektrolytlösungen von Kondensatoren oder sonstige organische Bestandteile der Platten. Abwassertoxizitätstests stehen noch aus. Weiter wurde das Prozesswasser auf folgende Metalle untersucht: Cu, Au, Ag, Pd. Es konnte nur Kupfer in einer niedrigen Konzentration nachgewiesen werden.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von EDF für das Recycling von Elektroschrott möglich ist. Verbunde zwischen Metallen und Kunststoffen können mittels EDF selektiv aufgeschlossen werden. Dadurch lassen sich gewünschte Komponenten, wie zum Beispiel verbaute Leiterplatten oder Batterien freilegen.

Bei Leiterplatten führt ein kontinuierlich steigender Energieeintrag zu verschiedenen Stufen: Entfernung von Komponenten, Auftrennen von Cu-Schichten in der Leiterplatte und die komplette Zerkleinerung und Zerstörung der Platte. Diese Zustände unterscheiden sich im Energieeintrag relativ stark, weshalb die unterschiedlichen Zustände gut reproduzierbar sind. Das Abtrennen der Komponenten führt zu einer Anreicherung von Metallen in der Komponenten- und Feinfraktion. Die erhaltenen, metallreichen Fraktionen können durch anschließende mechanische Trennung noch weiter angereichert werden. Das so erhaltene Konzentrat wird dann hydro- oder pyrometallurgisch weiter verarbeitet.

Der gezeigte Energieverbrauch soll erste Tendenzen andeuten, und nicht als absolute Grösse verstanden werden. Beim Einsatz einer kontinuierlichen Anlage kann ein niedriger Energieverbrauch erwartet werden.

4 ABKÜRZUNGEN

EDF: Elektrodynamische Fragmentierung
FHNW: Fachhochschule Nordwestschweiz
NE-Metall: Nichteisenmetall
PWB: Printed Wiring Board (Leiterplatte)
ULg: Universität Liège
WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment (Elektroschrott)

LITERATUR

- Art. 6 der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) vom 23.08.2005, SR 814.620
- Cui, J., Zhang, L. (2008) Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* 158, 228-256
- UNEP. (2009) Recycling From E-Waste to Resources. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies, 6
- Wu, B.Y., Chan, Y.C., Middendorf, A., Gu, X., Zhong, H.W. (2008) Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: A case study of mobile phones in China. *Journal of Environmental Sciences* 20, 1403-1408
- Yamane, L.H., Tavares de Moaraes, V., Croce Romano Espinosa, D., Alberto Soares Tenório, J. (2011) Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management* 31, 2553-2558