

# Nachhaltiges Elektronikschrottreycling durch individuelle Prozessgestaltung

Anna Trentmann, Nikolaus Borowski, Benedikt Flerus, Fabian Diaz, Alexander Birich, Bernd Friedrich

Im Jahr 2014 fielen weltweit erstmals über 40 Mio. t an Elektro- und Elektronikgeräten an. Mit einer jährlichen Wachstumsrate von 3 bis 5 % wird für das Jahr 2018 eine Masse von nahezu 50 Mio. t Elektronikschrott prognostiziert [1]. Bei der Bewältigung dieser Mengen stehen Recycler gestern wie heute vor der großen Herausforderung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Verwertung der Schrotte mit gleichzeitiger Wiedergewinnung darin enthaltener Wertstoffe. In diesem Zusammenhang hat sich das IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen zum Ziel gesetzt, ein Verfahrenskonzept zu entwickeln, bei dem sämtliche Metalle aus den Rücklaufgütern effizient und umweltgerecht wiedergewonnen werden können. Die Grundsteine bilden dabei hydro- und pyrometallurgische Prozesse sowie einzelne Schritte zur Vorkonditionierung des Materials. In Abhängigkeit vom Einsatzstoff und den gewünschten Produkten können die Teilprozesse nach dem Baukastenprinzip flexibel miteinander kombiniert werden, um auch speziellen Anforderungen gerecht zu werden.

Besonders im Bereich der Privatanwender ist zu beobachten, dass die Lebenszyklen und die „Haltbarkeit“ elektronischer Geräte in den letzten Jahren enorm gesunken sind. Ein Grund dafür ist vor allem das Kaufverhalten der Konsumenten, welche häufig den Anspruch verfolgen, an den neuesten technologischen Entwicklungen teilzuhaben. Als bestes Beispiel können hier Mobilfunkgeräte bzw. Smartphones mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von zweieinhalb Jahren angeführt werden [2]. Der hohe Durchsatz dieser und anderer Elektro- und Elektronikgeräte führt einerseits zu einem immer weiter wachsenden Berg an Elektronikschrott und fordert andererseits zur Produktion der Geräte einen anhaltend hohen Einsatz an Metallen, deren Gewinnung oft eine schonungslose Ausbeutung globaler Ressourcen bedeutet.

Statt der Deponie oder einfachen Verbrennung der Elektrogeräte bietet sich jedoch an, Metalle und andere Werkstoffe aus den entsorgten Geräten zurückzugewinnen und der Produktion wieder zuzuführen. In einem einzigen Handy sind beispielsweise bis zu 60 verschiedene Werkstoffe zu finden, darunter mehr als 20 Metalle. Dies sind neben den bekannten Basismetallen wie Kupfer, Aluminium und Eisen sowie verschiedenen Edelmetallen je nach Sorte

auch so genannte „kritische Metalle“. Die Eigenschaft „kritisch“ umschreibt weniger das geringe Vorkommen dieser Metalle in der Erdkruste, sondern ein hohes Versorgungsrisiko, kombiniert mit einer großen wirtschaftlichen Bedeutung, welche sich häufig in ihrer Unverzichtbarkeit für Technologieanwendungen äußert. Auch Mobiltelefone beinhalten diese Metalle, speziell Indium, Gallium und Germanium. Doch trotz der großen Chance die dieser Rohstoff bietet, gibt es noch kein umfassendes Recyclingverfahren, welches die aufkommenden Massen bewältigen kann und alle Metalle berücksichtigt, um das volle Potential des Rohstoffes auszuschöpfen.

Die hohe Inhomogenität des Stoffstromes Elektronikschrott sowie die angesprochene Vielfalt an Verbindungen und Elementen in den Rücklaufgütern lässt die Entwicklung eines umfassenden Recyclingverfahrens zu einer großen Herausforderung werden. Variierende Parameter im Stoffstrom sind sowohl die äußere Form, die sich im Bereich ganzer Geräte bis hin zu feinen Stäuben bewegt, als auch die chemische Zusammensetzung. Hier wird zunächst zwischen den Stoffgruppen Metalle, Kunststoff, Glas und Keramik unterschieden, welche alle in signifikanten Mengen im Elektronikschrott vertreten sind und je nach Recyclingverfahren zu unterschiedlichen Schwierigkeiten führen. Wird der Schrott beispielsweise zur Metallgewinnung mitsamt anhaftender Kunststoffe pyrometallurgisch verarbeitet, führt die Verbrennung der Organik zur Freisetzung großer Wärmemengen, wodurch der Schmelzprozess nur schwer zu kontrollieren ist. Daneben enthalten Kunststoffe häufig wesentliche Mengen an bromhaltigen Flammschutzmitteln, welche die Bildung korrosiver Gase begünstigen und somit das Abgassystem der Öfen strapazieren.

Am IME wird die Entwicklung eines Verfahrenskonzepts verfolgt, das auf dem Entwurf mehrerer Teilprozesse basiert, welche individuell miteinander kombiniert werden können und schließlich die Rückgewinnung unterschiedlicher Metalle ermöglicht. Die angesprochenen Hürden wie eine starke Heterogenität des Materials, hohe Anteile von Organik und die Freisetzung von Schadstoffen können durch eine geschickte Anordnung der einzelnen Module bewältigt werden. Abbildung 1 stellt exemplarisch eine mögliche Kombination der Module dar.

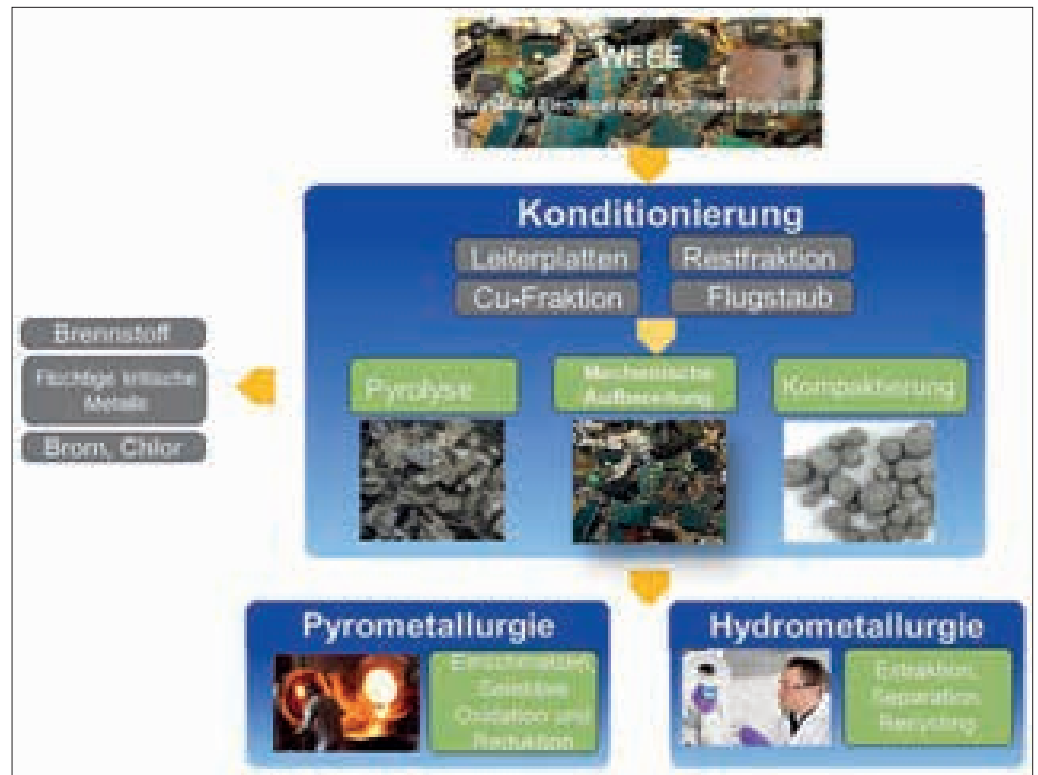


Abb. 1:  
Recyclingkonzept zur Verarbeitung von Elektronikschrott am IME

Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Teilverfahren, die das IME für die modular aufgebaute Metallrückgewinnung entwickelt, detaillierter vorgestellt.

### Thermische Konditionierung

Eine dem Schmelzprozess vorgelagerte thermische Konditionierung von Elektronikschrotten bietet sich an, um die eingangs erwähnten Probleme, welche sich in der Pyrometallurgie durch anhaftende Organik ergeben, zu umgehen. Dabei erfolgt über einen Pyrolyseprozess die thermische Zersetzung von langkettigen Kohlenwasserstoffen unter Sauerstoffabschluss mit dem Hauptziel, die Struktur des Kunststoffes aufzuspalten. Als Produkte dieser Art der thermischen Vorbehandlung entstehen ein Pyrolysegas sowie ein kohlenstoffreicher Feststoff, welcher die nicht flüchtigen Bestandteile des Einsatzmaterials wie Metalle, Glas und Keramik enthält (Abbildung 2).

Bei bisherigen Untersuchungen zum Pyrolyseprozess am IME konnte ein Massenverlust des Einsatzmaterials um 15 bis 20 % bei gleichzeitiger Anreicherung von Wertmetallen realisiert werden. Gemeinsam mit der flüchtigen Organik

werden zudem unerwünschte Halogene aus dem Material entfernt. Wird der Pyrolyserückstand im Nachgang mechanisch aufbereitet, erleichtert die mit der Pyrolyse erzielte Versprödung des nichtmetallischen Anteils die Trennung einzelner Fraktionen. Im Falle von elektronischen Leiterplatten können auf diesem Weg metallische Komponenten von der umgebenden Glasfasermatrix sehr leicht abgetrennt und ihrerseits metallurgisch weiterverarbeitet werden.

Daneben besteht die Option den Pyrolyseprozess dazu zu nutzen, um kritische Metalle (z.B. Gallium, Indium) selektiv anzureichern. Das angestrebte Ziel ist eine Reaktion zwischen dem Pyrolysegas und den kritischen Elementen, wonach die dabei entstehenden gasförmigen Metallverbindungen mit dem Abgas aus dem Reaktor ausgetragen und durch eine gezielte Abgasbehandlung aus dem Abgasstrom auskondensiert werden.

### Pyrometallurgie

Zur Rückgewinnung von Basis- und Edelmetallen aus Elektronikschrott bietet sich eine pyrometallurgische Verarbeitung der Elektronikschrotte an, wobei die Zielmetalle über

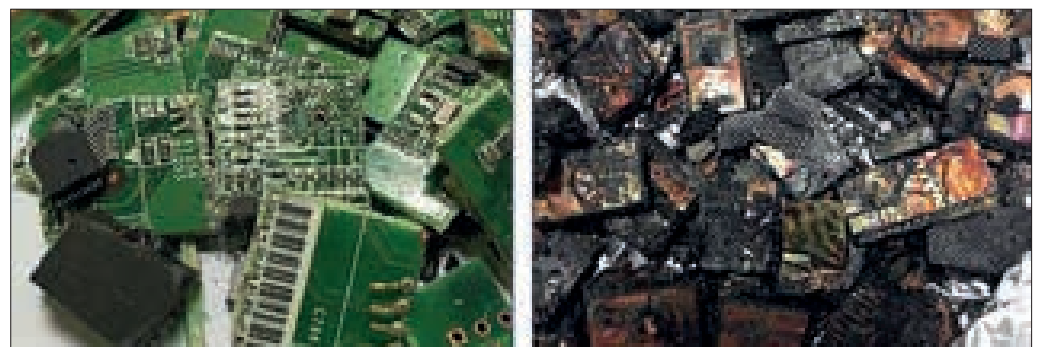


Abb. 2:  
Zerkleinerte Elektronikleiterplatten vor (links) und nach der Pyrolysebehandlung



Abb. 3:  
Pyrometallurgische Verarbeitung  
von E-Schrott am IME

die Bildung einer schmelzflüssigen Phase separiert werden. Am IME steht für den Schmelzprozess ein Drehtrommel-Ofen zur Verfügung, in den der Elektronikschrott direkt oder der aus der thermischen Konditionierung gewonnene Pyrolysekoks eingesetzt werden (Abbildung 3). Die darin enthaltenen hohen Anteile an Kohlenstoff werden als Energieträger genutzt und durch Sauerstoffzugabe verbrannt. Durch die dabei freiwerdende Wärme schmelzen Metalle und Glasfasern autotherm auf, was bedeutet, dass der gesamte Schmelzprozess ohne zusätzliche externe Energiezufuhr betrieben werden kann. Als Produkte entstehen eine Schlacke, in der Glasfasern und Keramiken, sowie eine Metallphase, in der Basis- und Edelmetalle zurückgewonnen werden. Die Herausforderung dieses Verfahrens besteht zum einen im Handling des großen Energiegehalts, zum anderen in der starken Heterogenität der Schrotte. Ein speziell dafür entwickelter Lösungsansatz nutzt ein neues Verfahren, bei dem zerkleinerte und individuell gemischte Schrotte unter eine Schaumphase eingeblasen werden. Ziel dieses Verfahrens ist es, durch den Einsatz einer gezielten Mischung unterschiedlicher Schrotte den Energie- und Metallgehalt so weit zu homogenisieren, dass ein stabiler Schmelzprozess garantiert werden kann. Weitere Vorteile dieses Verfahrens sind neben der Stabilisierung des Prozesses auch die große Effektivität, die durch das direkte Einblasen der zerkleinerten Einsatzmaterialien in die Schmelzzone resultiert. Durch die daraus resultierende hohe Schmelzgeschwindigkeit kann ein großer Massendurchsatz realisiert werden, der verspricht, die anfallenden Schrottmengen bewältigen zu können.

### Kompaktierung und Pelletierung

Während der Zerkleinerung von Elektronikschrott fallen unter anderem Filterstäube an, welche eine große Ver-

lustquelle für Edelmetalle wie z.B. Gold darstellen. Das linke Bild in Abbildung 4 zeigt die Mikroskopaufnahme eines solchen Filterstaubes. Bedingt durch die geringe Größe edelmetallhaltiger Bauteile in Elektronikgeräten werden Goldpartikel verstärkt über die Absaugung aus dem Prozess ausgetragen. Um auch diese Fraktion der Wertschöpfungskette wieder zurückzuführen, wird ein spezieller Konditionierungsprozess entwickelt, in dem aus den Filterstäuben autogene Pellets für den metallurgischen Schmelzprozess hergestellt werden (Abbildung 4, rechts). Im Mittelpunkt steht hierbei die richtige Wahl der Zusammensetzung der Pellets hinsichtlich der optimalen Nutzung der im Staub enthaltenen Kohlenwasserstoffe als Energieträger sowie der Zusammenstellung der Schlackenbildner. Neben ihrer Funktion als Bindemittel dienen diese Zuschläge als Flussmittel zur Beeinflussung der Viskosität und des Schmelzpunktes der Schlackenphase. Diese Eigenschaften sind von großer Bedeutung, um Metallverluste in der Schlacke zu vermeiden und die Zielmetalle möglichst vollständig in einer Metallphase zu sammeln.

### Hydrometallurgie

Im Vergleich zu pyrometallurgischen Verfahren weisen hydrometallurgische Prozesse zwei wesentliche Vorteile auf, die beim Recycling von komplex zusammengesetztem Elektronikschrott genutzt werden können. Auf der einen Seite sind nasschemische Verfahren sehr selektiv hinsichtlich der Separation einzelner Metalle. Auf der anderen Seite wird eine kosteneffiziente Rückgewinnung selbst niedrigkonzentrierter Elemente ermöglicht. Über eine geschickte Wahl der Chemikalien sowie Einstellung weiterer Prozessparameter wie Druck und Temperatur können ge-



Abb. 4:  
Unklassierter Filterstaub unter  
400-facher Vergrößerung und ge-  
trocknete Pellets auf Basis von  
Filterstaub

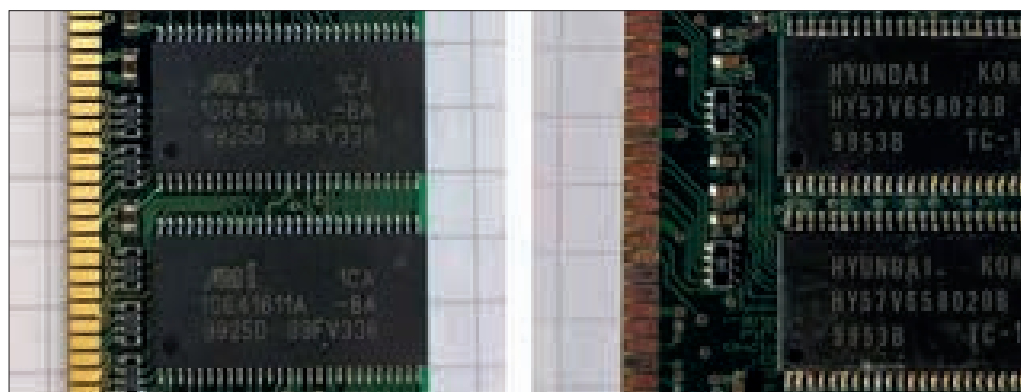


Abb. 5:  
Selektive Goldextraktion – links vor, rechts nach der hydrometallurgischen Behandlung

zielt Elemente gelöst und anschließend durch Fällung oder Solventextraktion separiert werden.

Ein Forschungsansatz beschäftigt sich mit der direkten hydrometallurgischen Behandlung von Elektronikschrott und insbesondere von Leiterplatten, wobei Metalle an der Bauteiloberfläche ohne weitere Vorbehandlungsschritte extrahiert werden. Andere Metalle, die sich dagegen unter der chemisch beständigen Kunststoffschicht befinden, werden nicht angegriffen und können in einem späteren Prozess gewonnen werden. Speziell für die Rückgewinnung von Gold erweist sich diese Methode als vielversprechend, da dieses Edelmetall einen Großteil des Wertes der im Elektronikschrott enthaltenen Metalle ausmacht. Abbildung 5 veranschaulicht das Ergebnis selektiver Goldextraktion am Beispiel einer Leiterplatte.

Mit den beschriebenen Teilprozessen stehen Instrumente zur Verfügung, die bei entsprechender Hintereinanderschaltung einen Gesamtprozess ergeben, welcher individuell auf die gegebenen Anforderungen angepasst werden kann und der hohen Komplexität des Rohstoffs Elektronikschrott gerecht wird. Das Ziel ist dabei die maximale Nutzung des Rohstoffpotentials von Elektroaltgeräten bei einer minimalen Erzeugung von Deponiestoffen.

#### Danksagung:

Wir danken dem AKR e.V. für die Möglichkeit, diesen Beitrag in den RWTH Themen im Rahmen einer Gesamtdarstellung der Aachener Rohstoffkompetenzen veröffentlicht haben zu dürfen.

#### Literatur

- [1] BALDÉ, C.P., WANG, F., KUEHR, R. & HUISMAN, J. (2015): The global e-waste monitor – 2014. – United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.
- [2] MANHART, A., RIEWE, T. & BROMER, E. (2012): Prosa Smartphones – Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen. – Öko-Institut e.V. (Hrsg.), Freiburg.

Anna Trentmann, M.Sc.  
Nikolaus Borowski, M.Sc.  
Fabian Diaz, M.Sc.  
Alexander Birich, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich  
Alle:  
RWTH Aachen  
IME Institute of Process Metallurgy and Metal Recycling  
Intzestraße 3  
52056 Aachen  
Germany  
ATrentmann@metallurgie.rwth-aachen.de  
FDiaz@metallurgie.rwth-aachen.de  
BFriedrich@metallurgie.rwth-aachen.de  
Benedikt Flerus, M.Sc.  
Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS  
Brentanostraße 2  
63755 Alzenau  
Germany