

# Thermische Behandlung von Elektro- und Elektronikschrott

Kerstin Kuchta

1.	Zusammensetzung von Elektro- und Elektronikaltgeräten .....	384
2.	Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott .....	385
3.	Einsatz thermischer Verfahren in der Aufbereitung .....	386
4.	Stand der Technik der Ascheaufbereitung von thermischen Verfahren .....	388
5.	Zusammenfassung .....	389
6.	Literatur .....	389

Das Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) zielt vor allem auf die metallischen Werkstoffe aus Gehäusen, mechanischen sowie elektrischen und elektronischen Bauteilen ab. Eine weitere stoffliche Verwertung, d.h. das Recycling von nichtmetallischen Komponenten, wie Kunststoffen oder Glas, wird in der Regel nur ansatzweise verfolgt. Entsprechend werden Elektroaltgeräte bereits nach metallischen Gehalten gerätespezifisch und ressourcenorientiert in sogenannten Sammelgruppen erfasst und separat aufbereitet.

Die Aufbereitung umfasst je nach Metallart und Metallgehalt mechanische und manuelle Schritte, welche insgesamt zu Fraktionen führen sollen, die direkt in nachgeschalteten metallurgischen Prozessen oder in metallurgischen Aufbereitungsprozessen verwertet werden können. Zielfraktionen sind hier zum Beispiel Platinen-Fraktionen verschiedener Güte, Stahl- und Aluminiumfraktionen aus Gehäusekomponenten oder Bauteilen, z.B. Kühlern.

Die gewonnenen ressourcenreichen Metallfraktionen werden in bestehenden pyrometallurgischen Prozessen (Refining) verarbeitet und die Metalle in nachgeschalteten hydrometallurgischen Prozessen rückgewonnen. In Bezug auf die Zielmetalle können dabei Rückgewinnungsraten von bis zu 99 Prozent erreicht werden, während andere ebenfalls kritische Metalle nicht rückgewonnen werden.

Vor diesem Hintergrund wird im folgenden Beitrag diskutiert, ob und in welchem Maße ein thermisches Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten erfolgen kann und in welchem Umfang dies zur Rückgewinnung der metallischen Werkstoffe beitragen kann.

## 1. Zusammensetzung von Elektro- und Elektronikgeräten

Es werden jährlich etwa 1,5 Millionen Tonnen elektrischer Geräte in Verkehr gebracht und gleichzeitig EAG im Umfang von etwa 700.000 t/a im registrierten System erfasst und einem qualifiziertem Recycling zugeführt. Da allgemein von einem gesättigten Markt ausgegangen wird, sollte korrespondierend zu einem Neugerät ein elektrisches oder elektronisches Altgerät in die Entsorgung gelangen. Daraus ergibt sich eine fehlende Menge von EAGs, welche in den Haushalten oder Unternehmen gelagert werden, nicht über nicht registrierte Wege dem Recycling zugeführt oder mit dem Restabfall entsorgt, d.h. einer thermischen Verwertungsanlage zugeführt werden.

Da sich die Elektro- und Elektronikgeräte (EAG) in Aufbau und Funktion unterscheiden, variiert auch der gerätespezifische Gehalt an Basismetallen und kritischen Metallen. Entsprechend ist der Anteil von Stahl- und Eisenmetallen bei Heiz- und Kühlgeräten mit 41,5 Prozent und bei Haushaltsgroßgeräten von 72 Prozent der Hauptbestandteil. Bei Fernsehgeräten, Monitoren und Beleuchtungskörpern kann dagegen Glas mit bis zu 80 Prozent den dominierenden Werkstoff darstellen [10].

Computer, Telefone, Fernsehgeräte oder Monitore weisen einen recycling-relevanten Gehalt in Bezug auf die Edelmetalle Silber, Gold und Palladium sowie die kritischen Metalle, z.B. Seltenen Erden, Kobalt oder Tantal, auf. Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung von Analysen zum Metallgehalt von elektrischen und elektronischen Geräten.

Tabelle 1: Zusammenstellung von Metallkonzentrationen in ressourcenrelevanten Elektro- und Elektronikgeräten

EAG	Metallkonzentration g/kg <sub>Gerät</sub>							
	Gold	Silber	Palladium	Kobalt	Indium	Neodym	Yttrium	Tantal
Laptop	0,09	0,15	0,02	12,07	0,01	0,72	< 0,001	0,79
Tablet	0,22	0,04	0,016	0,026	0,05	0,57	0,003	0,04
Externe Festplatten	0,01	0,05	0,01	k.A.	k.A.	10,91	k.A.	k.A.
USB Stick	7,48	1,83	0,01	1,50	k.A.	0,80	k.A.	k.A.
Multifunktionsdrucker	0,003	0,01	0,001	0,003	< 0,001	k.A.	< 0,001	0,001
Schnurloses Telefon	0,07	1,3	0,05	1,57	0,07	0,73	0,01	0,002
Mobiltelefon	0,54	3,83	0,21	41,67	0,06	0,75	k.A.	0,79
Digitalkamera	0,33	0,51	0,05	5,01	0,01	0,39	0,08	0,8
Fernbedienung	0,04	0,32	0,02	0,06	0,01	0,04	0,002	0,04
DVD-Player	0,11	0,84	0,004	0,02	k.A.	0,1	k.A.	0,01
Spielkonsolen	0,13	0,68	0,02	0,10	k.A.	0,8	0,02	0,02
Lautsprecher	0,002	0,01	0,001	< 0,001	k.A.	3,18	k.A.	k.A.
Kopfhörer	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	13,70	k.A.	k.A.
SSD	0,013	0,078	0,008	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
LCD TV	0,011	0,045	0,004	k.A.	< 0,001	k.A.	0,01	k.A.
LED TV	0,011	0,045	0,004	k.A.	< 0,001	k.A.	0,001	k.A.
Smart Phones	0,317	2,033	0,125	52,500	k.A.	0,417	k.A.	k.A.

nach Hobohm, J.: Ressourcenoptimierte Erfassung von Elektro- und Elektronikgeräten. Dissertation TU Hamburg, 2017

Die Tabelle zeigt, dass EAG im Vergleich mit primären Erzen oftmals einen beachtlichen Metallgehalt aufweisen und zu Recht als ein urbanes Erz mit vorrangiger Verwertungspriorität behandelt werden können.

## 2. Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott

Aktuell werden die Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) in sogenannten Sammelgruppen an öffentlichen Sammelstellen (Depotcontainer oder Recyclinghöfe) sowie vom Handel direkt in den Verkaufsräumen oder bei der Lieferung von Neugeräten erfasst. In diese Erfassungssysteme fließen jährlich 600.000 bis 700.000 Tonnen, entsprechend etwa 8 kg/Ea. Weitere Mengen werden ohne Registrierung einem qualifizierten Recycling zugeführt oder mit dem Hausmüll entsorgt und einer direkten Dokumentation und Aufbereitung entzogen. Über die Restmüllentsorgung, das belegen Haumüllsortierungen, werden 1 bis 2 kg/Ea einer thermischen Behandlung zugeführt. Da im Rahmen einer Rostaschenbehandlung ein Großteil der Metalle zurückgewonnen wird, gehen in diesem Fall nur die Kunststoffe vollständig für ein Recycling verloren.

Die getrennt erfassten EAG werden je nach Werthaltigkeit einer manuellen und/oder mechanischen Aufbereitung zugeführt. Geräte, welche über einen hohen Anteil an Leiterplatten und einen hohen Gehalt an Bundmetallen verfügen, wie z.B. Computer, Laptops oder Messgeräte, werden in der Regel manuell zerlegt und die gewonnenen Fraktionen (z.B. Leiterplatten, Gehäuse, Kabel) direkt metallurgischen Verfahren zugeführt.

Niederwertige Geräte werden in einer mechanischen Aufbereitung in weitestgehend sortenreine Fraktionen überführt, mit dem Ziel, die in EAGs enthaltenden Roh- und Werkstoffe, für nachfolgende Verwertungsprozesse aufzuschließen. Typische Fraktionen sind Aluminium, *NE-Metalle*, FE-Metallen oder einzelnen Kunststoffsorten. Dabei ist die Verarbeitungstiefe und Output-Qualität auch von den nachgeschalteten metallurgischen, thermischen oder kunststoffverarbeitenden Verfahren abhängig (Bild 1).

Aus der manuellen Zerlegung können darüber hinaus Kunststoffe, vor allem Polypropylen (PP), Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), Polycarbonat (PC) und Polystyrol (PS) in Qualitäten separiert werden, welche stofflich verwertet werden können. Eingeschränkt wird die Verwertung durch das Vorhandensein halogenierter Flammenschutzmittel, welche eine stoffliche Verwertung in anderen Bereichen als der Elektrotechnik verhindern. Zusätzliche logistische bzw. Verfügbarkeitsanforderungen lenken den Fokus des Kunststoffrecyclings aus EAG auf einfach zu separierende bzw. zu bestimmende Gehäuseteile von EAG. Die so gewinnbaren Rezyklate sind sortenrein, verfügen über eine hohe Qualität und können, durch die in der Regel homogene Farbgestaltung von Elektrogerät-Gehäusen, unmittelbar in den Wiedereinsatz gelangen. Die rohstoffliche Verwertung von EAG Kunststoffteilen nach chemischer Behandlung hat bisher keine technische Bedeutung erlangt.

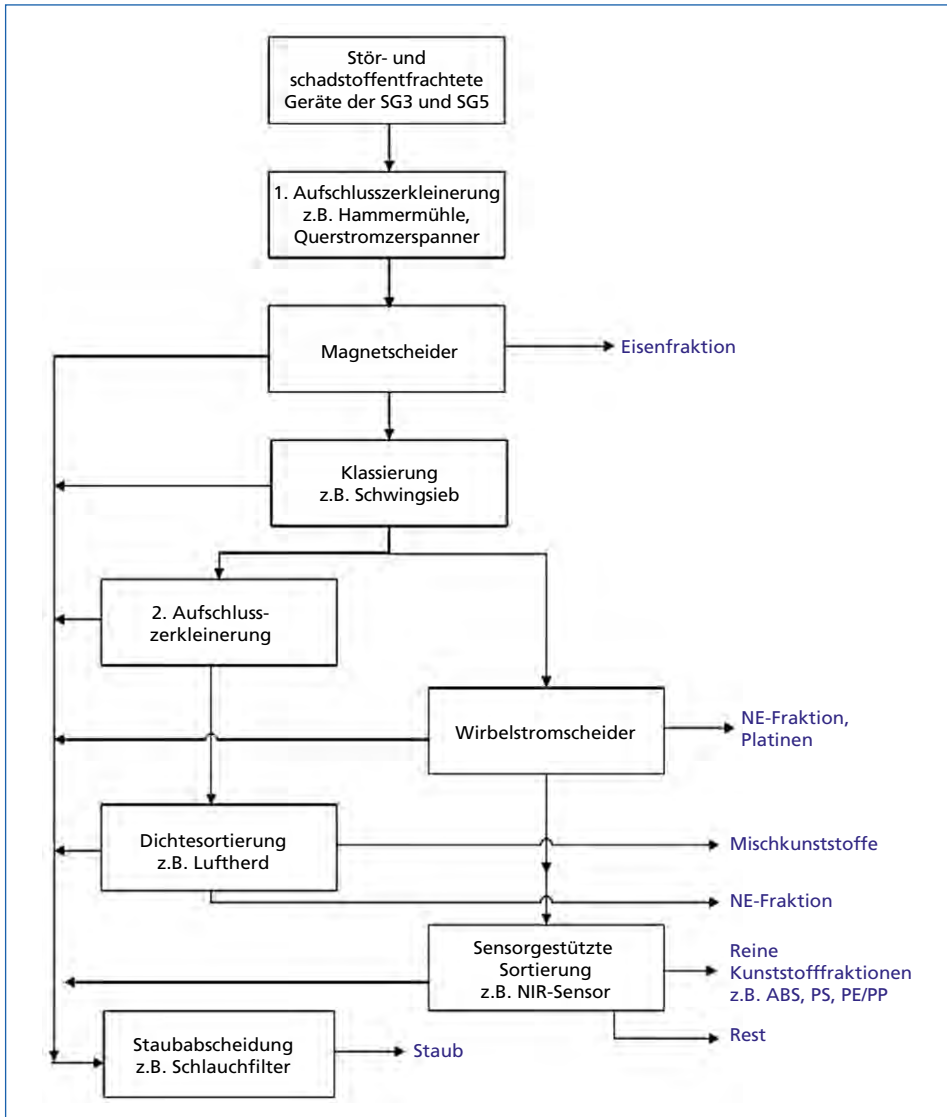


Bild 1: Verfahrensbeispiel einer Recyclinganlage für Haushaltskleingeräte

Quelle: Westpfahl, L.: Entwicklung eines technischen Konzepts zum Recycling von NdFeB-Magneten aus Elektro- und Elektronikgeräten. Dissertation TU Hamburg, 2015

### 3. Einsatz thermischer Verfahren in der Aufbereitung

Der bisherige Einsatz thermischer Verfahren in der Aufbereitung von EAG zielt nicht auf das Recycling von Kunststoffen oder anderen organischen Stoffen. Im Mittelpunkt steht hier die Vorbehandlung der Bestandteile mit dem Zweck der Abtrennung

von Kunststoffen und der Auftrennung von organisch-metallischen Verbundstoffen unterschiedlichster Gemische und Abfälle [4]. Vor dem Hintergrund des geringen Gehalts an mineralischen Stoffen in EAG (Ausnahme CRT-Monitore) enthalten die Rückstände der thermischen Behandlung bis zu 85 Prozent Metall, was den weiteren Aufbereitungsaufwand erheblich reduzieren kann.

Die thermischen Aufbereitungs-, Trenn- und Recyclingverfahren haben in der Rückholung von Eisen und Nicht-Eisen-Metallen eine lange Tradition. Neben pyrometallurgischen Verfahren der Erz- und Metallaufbereitung ist die Abtrennung von organischen Stoffen sowie die integrierte Nutzung der entstehenden Energie vor allem in pyrolytischen Verfahren erfolgreich betrieben worden.

Grundsätzlich stehen die Verbrennung, die Pyrolyse bzw. thermo-chemische Verfahren oder Schmelzverfahren zur Verfügung. Dabei ist die Eignung bzw. der Vorrang eines Verfahrens, grundsätzlich immer auf der Basis des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§6 KrWG) zu bewerten.

Die Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung, welche kontinuierlich ein bis zwei Prozent EAGs verwerten, haben ihre Eignung zumindest in Bezug auf die Co-Verbrennung nachhaltig bewiesen. Das Gleiche kann bezüglich der grundsätzlichen Eignung von Drehrohröfen festgehalten werden. Auch diese haben ihre Praxistauglichkeit in mannigfaltiger Anwendung belegt. Zusätzliche Gedanken zum Einsatz von Mono-EAG-Fractionen in Verbrennungsverfahren folgen weiter unten.

Das Kayser-Recycling-System der Aurubis AG ist ein weiteres Beispiel für die Anwendung thermischer Verfahren in der Prozesskette des EAG Recyclings. Hier liegt eine Kombination von reduzierendem Einschmelzen und oxidierendem Konvertieren vor, welche im Ergebnis eine Kupferschmelze inklusive Zinn, Nickel, Blei und Edelmetallen, eine Zinkoxid-Anreicherung im Flugstaub sowie eine Eisen-Siliziumoxid-Schlacke erzeugt. Die Roh-Kupferschmelze wird weiter in eine Kupferlegierung (inkl. Edelmetalle und Nickel) und Bleischlacke (inkl. Zinn) konvertiert. In diesem Prozess wird der Kunststoffanteil des aufbereiteten EAGs als Energiequelle genutzt. [1]

Der Einsatz von Pyrolyseverfahren als Vorbehandlung wurde zum Beispiel von Diaz et al. [3] beschrieben. Die Vorteile dieses nicht oxidierenden Verfahrens liegt in der geringen chemischen Beeinflussung der metallischen Werkstoffe im Rahmen der Behandlung, d.h. das weitere Refining wird relevant vereinfacht. Die Verwertung der entstehenden Öle, Gase und kohleartigen Rückstände wirft in der Praxis noch eine Reihe von organisatorischen, technischen und rechtlichen Fragen auf. Entsprechend sind diese Stoffe in der Regel nur direkt zur Deckung der Wärmeenergie des Verfahrens einsetzbar.

Bereits in 2008 nutzte die Firma Currenta einen Drehrohrtrommelofen zur thermischen Behandlung von Elektro-Schrott bei 600 bis 1.000 °C in [2, 5]. In einem abgestimmten Prozess von Vorbehandlung, Temperatur und Verweilzeit (bis zu mehreren Stunden) werden die organischen Bestandteile von den Zielmetallen getrennt, welche anschließend weiter aufbereitet wird.

Die aktuellen Ergebnisse der ATR Projekts aus der r<sup>3</sup>-Programmlinie des BMBF zeigen, dass auch die thermische Mono-Behandlung von aufbereiteten EAG zielführend sein kann. Im Rahmen des Projekts wurden am Fraunhofer-Institut UMSICHT Fraktionen aus WEEE-Recyclingprozessen verbrannt und anschließend mechanisch aufbereitet. Die Ergebnisse belegen, dass die energieautarke Monoverbrennung von zerkleinerten EAG-Fraktionen möglich ist, und dass die Rückgewinnungsquoten und Qualitäten von Nichteisenmetallen aus diesen Verbrennungsrückständen grundsätzlich ökologisch und sozioökonomisch vorteilhaft sind. Das Gleiche gilt nach diesen Untersuchungen für die Metallrückgewinnung aus Rostaschen von Abfallverbrennungsanlagen. Eine weitere Steigerung der Aufbereitungstiefe wurde darüber hinaus, auch unter Berücksichtigung der Emissionen der Aufbereitungsverfahren, als generell ökologisch bewertet. [9]

#### 4. Stand der Technik der Ascheaufbereitung von thermischen Verfahren

In 2010 wurden in Deutschland 24 Millionen Tonnen Abfall mit einem Metallgehalt von etwa zwei Prozent thermisch verwertet. Entsprechend bestehen Rostaschen heute zu etwa zehn Prozent aus Metallen, etwa 88 Prozent Mineralik und 1 bis 2 Prozent Unverbranntem; wobei die Zusammensetzung der Rostaschen im Wesentlichen durch den Input bestimmt wird. Der Hauptbestandteil der Metallfraktion ist Eisen, gefolgt von Aluminium, Kupfer, Zink und anderen Schwermetallen. In geringen Konzentrationen und Spuren sind Edelmetalle und weitere kritische Metalle enthalten. [7]

Da während der Verbrennung nahezu die komplette organische Substanz umgesetzt wird, verbleiben als Rückstände die Flugaschen, Reste der Abgasreinigung sowie die Rostasche.

Eine Rostaschenaufbereitungsanlage nach aktuellem Stand der Technik umfasst 2015 die folgenden Aggregate, wird wie beschrieben betrieben und erreicht die im Folgenden angegebenen Rückgewinnungsquoten:

Die Rostasche wird im Allgemeinen direkt oder nach kurzer Lagerung (etwa zwei bis vier Wochen) verarbeitet. Anschließend erfolgt eine Klassierung mittels Siebschnitten in verschiedene Körnungen. Die anschließende Bearbeitung, d.h. Metallrückgewinnung, erfolgt in der Regel für alle Körnungen größer 2 mm. Einzelne Anlagen bearbeiten auch die Körnung 0-2 mm. Es werden im Mittel fünf Eisenabscheider an den verschiedenen Körnungslinien eingesetzt. Nach der Abtrennung von Unverbranntem mittels Windsichter und einer Grobentschrottung, erfolgt mindestens vor jedem NE-Scheider eine Eisenabtrennung. Im Mittel werden fünf NE-Abscheider zur Abtrennung von gemischten Nichteisenmetallen eingesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass im gewichteten Mittel 7,7 Gew.-% der Aschemenge als Eisen und 1,3 Gew.-% Nicht-Eisenmetall zurückgewonnen werden. [7]

Vor dem Hintergrund des dargestellten Standes der Technik wird thermisches Recycling mittels Rückholung der Basismetalle sowie der weiteren Bunt- und Schwermetalle aus den Rostaschen mit geringen Verlusten technisch erfolgreich betrieben.

## 5. Zusammenfassung

Pro Jahr werden 1,5 Millionen Tonnen Elektro- und Elektronikaltgeräte auf den Markt gebracht und gleichzeitig jährlich 8 kg EAG/E dokumentiert einem qualifizierten Recycling zugeführt. Weitere Mengen werden ohne Dokumentation recycelt, in den Haushalten und Unternehmen gelagert. 1 bis 2 kg EAG/Ea werden bereits heute über Abfallverbrennungsanlagen thermisch behandelt und die Metalle erfolgreich recycelt. Während die Metallgehalte der EAG im Fokus der Aufbereitungs- und Recyclingprozesse von EAG stehen, werden die enthaltenen Kunststoffe und mineralischen Bestandteile in der Regel keiner hochwertigen Verwertung zugeführt. Entsprechend wurde die Eignung von thermischen Verfahren, neben den gängigen mechanischen Aufbereitungs- und Trennverfahren, nur zur Abtrennung und Rückholung der Metalle untersucht.

Es zeigt sich, dass neben der Verbrennung vor allem pyrolytische Verfahren zur Aufbereitung von EAG untersucht wurden. Alle bisher erprobten Verfahren können eine Abtrennung der organischen Stoffe gewährleisten und erleichtern somit die nachgeschaltete Aufbereitung erheblich. Während die Pyrolyse im Forschungsmaßstab sehr gute Ergebnisse zeigt, werden die Verbrennungsverfahren, z.B. für Restabfall, Industrieabfall oder Monofractionen, bereits seit langem und in großem Umfang eingesetzt. Die Darstellungen zum Stand der Technik der nachgeschalteten Ascheaufbereitung belegen, dass in diesen Verfahren das Recycling der Metallfraktionen weitgehend gewährleistet ist.

Vor diesem Hintergrund werden die thermischen Verfahren als ein relevanter Bestandteil der Recyclingkette von Metallen aus EAG eingestuft.

## 6. Literatur

- [1] AURUBIS: Die Technologie des Recyclings. 2016; <https://www.aurubis.com/de/de/shared/corp/produkte--leistungen/recycling/technologie> eingesehen am 15.1.2017
- [2] Bayer, J.: Method for recovering metals from waste and other materials comprising organic components. EP 1880028 A1, 2008
- [3] Diaz, F.; Trentmann, A.; Latacz, D.; Friedrich, B.: Thermische Konditionierung (Pyrolyse) zur Verbesserung der Rückgewinnbarkeit kritischer Metalle aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 373-389
- [4] Faulstich, M.; Vodegel, S.; Fedianina, E.; Franke, M.; Degener, P.; Aigner, J.; Reh, K.: Umweltschutzgerechte Verwertung nicht etablierter Stoffströme in Abfallverbrennungsanlagen UBA Schriftenreihe 18/2016; Dessau, 2016; ISSN 1862-4804 <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschutzgerechte-verwertung-nicht-etablierter>
- [5] Gennen, H.: Prozesse optimieren und Abfälle verringern durch *Lock-In*. [www.chemanager-online.com/file/track/26725/1](http://www.chemanager-online.com/file/track/26725/1)
- [6] Hobohm, J.: Ressourcenoptimierte Erfassung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Dissertation TU Hamburg, 2017

- [7] Kuchta, K.; Enzner, V.: Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. EdDE-Dokumentation Nr. 17. Oktober 2015
- [8] Maurell-Lopez, S.; Ayhan, M.; Eschen, M.; Friedrich, B.: Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012; ISBN 978-3-935317-82-5
- [9] Simon, F.-G.; Holm, O.; Adam, C: Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR). BAM Eigenverlag 2016, Berlin
- [10] VDI 2343 Blatt 2: 2010-02 Recycling elektrischer und elektronischer Geräte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010
- [11] Westpfahl, L.: Entwicklung eines technischen Konzepts zum Recycling von NdFeB-Magneten aus Elektro- und Elektronikaltgeräten. Dissertation TU Hamburg, 2015