

Hochwertige Abfallverwertung durch verwertungsorientierte Identifikation und Lenkung von Stoffströmen

Helmut Spoo

1.	Hochwertiges Recycling nach dem Product Mining-Konzept	517
2.	Seltene Erden und Technologiemetalle.....	518
3.	Chemikalienrecht versus Abfallrecht	519
4.	Neuartiges Analysenverfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Zusammensetzung von Abfällen	520
5.	Hochwertige Verwertung am Beispiel des Recyclings von Beton	523
5.1.	Rückgewinnung der Komponenten Kies und Zement aus Beton	524
5.2.	Betonrecycling – ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung	525
5.3.	Hemmnisse für ein hochwertiges Recycling	526
6.	Hochwertiges Recycling am Beispiel Elektroaltgeräte	528
6.1.	Ist-Situation und künftige Entwicklungen.....	528
6.2.	Anlage zur hochwertigen Verwertung von Elektroaltgeräten.....	529
7.	Zusammenfassung	530
8.	Quellen	530

Die Abfallwirtschaft ist im Wandel. Ausgehend vom Abfallbeseitigungsgesetz aus dem Jahre 1972 über das Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz 1986) wurde mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz die Abkehr von der Wegwerfgesellschaft eingeleitet. Die Schließung von Kreisläufen ist das Ziel des im Jahre 1994 verabschiedeten Gesetzes, das 2012 novelliert und an die EU-Abfallrahmenrichtlinie angepasst wurde und nun Kreislaufwirtschaftsgesetz heißt. Mit dem Wegfall des Begriffes *Abfall* im Gesetzestitel ist der Abfall aber keineswegs fort. Im Gegenteil – aktuelle Zahlen zeigen, dass das Abfallaufkommen, wie jüngst am Beispiel der Verpackungsabfälle deutlich wurde, zunimmt.

Auch im Bereich Rohstoffe steigen die in der Bundesrepublik (aber auch in anderen Ländern) verbrauchten Mengen. Deutschland verbraucht im Vergleich zu seiner Einwohnerzahl überproportional viel an Rohstoffen – so das Ergebnis einer

Untersuchung des Öko-Instituts Darmstadt, deren Ergebnisse und Handlungsempfehlungen am 01.12.2016 in Berlin vorgestellt wurden. Untersucht wurde schwerpunktmäßig die Gewinnung von Erzen, Industriemetallen und Baumaterialien. Schon heute sind die Auswirkungen der Rohstoffgewinnung dramatisch. Von *fatalen ökonomischen, sozialen und ökologischen Folgen* ist die Rede. Drei der zehn weltweit am meisten verschmutzten Orte wurden durch Bergbau und Erzverhüttung kontaminiert.

Der Abbau von Primärrohstoffen, einhergehend mit dem steigenden Ressourcenverbrauch, hat auch massive Auswirkungen auf die Klimaerwärmung. Allein die weltweite Produktion von Stahl und Zement verursacht jährlich 5,7 Milliarden Tonnen CO_{2eq}. Das ist das Sechsfache dessen, was die gesamte Bundesrepublik Deutschland in einem Jahr emittiert [2].

Die Gewinnung von Primärrohstoffen stößt auch immer häufiger auf Widerstand und Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung. Dies zeigen erste Ergebnisse eines laufenden Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Stadt- und Regionalentwicklung der Universität Tübingen mit dem Titel *Die Auswirkungen der sozialen Akzeptanz auf den Abbau mineralischer Rohstoffe* [4, 15]. In der folgenden Tabelle 1 sind die Pro- und Contra-Argumente am Beispiel des Abbaus von Kies dargestellt.

Tabelle 1: Argumente zur Bewertung des Abbaus mineralische Rohstoffe

Contra	Pro
• Zerstörung von Landschaft, Heimat, Wohnumfeld	• Rohstoffsicherung und Nutzen
• Emissionen (Lärm, Staub) und Belastungen	• Renaturierungen, Rekultivierungen mit Folgenutzungen
• Auswirkungen auf den Wasserhaushalt	• Entstehung Biotope mit schützenswerten Arten
• Negative Folgen für Natur und Umwelt	• Arbeitsplätze und Ertrag/Nutzen
• Flächenverluste	• Ortsnahe Rohstoffversorgung und kurze Transportwege
• Wirtschaftliche Einbußen und weitere Befürchtungen	• Abbau als Teil der Region/Landschaft

Quelle: Weber, F.; Jenal, C.; Kühne, O.: Facetten und Sichtweisen zur Gewinnung mineralischer Rohstoffe. Gesteins Perspektiven, 3/2016

Es wäre praxisfremd, anzunehmen, auf eine Primärrohstoffgewinnung könne weitestgehend verzichtet werden. Angesichts der skizzierten Entwicklungen wird sich der Bergbau aber den Umweltauswirkungen seines Tuns stellen müssen. Diese Umweltauswirkungen werden bislang bei der Preisgestaltung von Produkten ausgeblendet (bzw. den Förderländern hinterlassen – dies schafft sozialen Unfrieden), müssen aber künftig eingepreist werden (z.B. Primärrohstoffabgabe, Kies-Euro).

Künftig wird *Bergbau* vermehrt auch an den Produkten stattfinden müssen. Produkte sind die *Lagerstätten* von morgen. Die darin enthaltenen Rohstoffe gilt es, mit entsprechenden Verfahren zurückzugewinnen.

Voraussetzung für eine wirkliche Kreislaufwirtschaft ist, dass die erzeugten Sekundärrohstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihrer Eigenschaften mit Primärrohstoffen vergleichbar sind. Hier geht es also in erster Linie um die Effizienz des

Recyclingprozesses und die Erzeugung qualitätsgesicherter Rezyklate, die die Anforderungen (z.B. bautechnische Anforderungen) der entsprechenden Verwendungsbereiche in vollem Umfang erfüllen.

Im folgenden Beitrag wird am Beispiel von Altbeton und Elektroaltgeräten eine Strategie zur hochwertigen Verwertung dieser Abfallströme dargestellt. Vorgestellt werden zwei innovative Verwertungsverfahren sowie eine neuartige Analysetechnik zur Schadstoffidentifikation und zur verwertungsorientierten Lenkung von Stoffströmen.

1. Hochwertiges Recycling nach dem Product Mining-Konzept

Kreislaufwirtschaft kann nur funktionieren, wenn die erzeugten Sekundärrohstoffe mit Primärrohstoffen gleichwertig sind.

Eine andere Facette von *Bergbau* wird künftig an den Produkten stattfinden – nämlich Recycling, und zwar hochwertiges Recycling. Wir brauchen effizientes Recycling. Klasse statt Masse muss das Ziel sein.

Sammel- und Sortierquoten sind wichtig, sagen aber alleine gar nichts aus über die Effizienz und Qualität des Recyclingprozesses. *Rechenschiebereien um Abfallquoten* – so lautete der Titel eines Berichtes in den *VDI-Nachrichten* vom 07. Oktober 2016 [1]. In dem Bericht wird beschrieben, dass in der Europäischen Union allein im Verpackungsbereich 10 unterschiedliche Berechnungsmethoden existieren.

Das Konzept *Product Mining – Rohstoffe aus Produkten* hat neben der Steigerung der Erfassungsmengen vor allem die Erhöhung der Rohstoffrückgewinnungseffizienz von Verwertungsverfahren zum Ziel und basiert auf drei Säulen (Bild 1).

- Stoffstrommanagement und effiziente Erfassungs- und Rückhollogistik,
- Schadstoffbeseitigung und innovative und effiziente Trenn- und Sortiertechnik,
- Qualitätskontrolle und Erzeugung qualitätsüberwachter Sekundärrohstoffe.

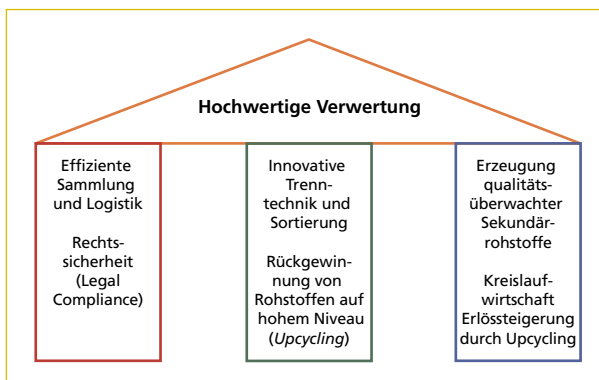


Bild 1:

Hochwertige Verwertung nach dem Product Mining-Konzept

Eine effiziente Erfassungslogistik ist insbesondere dort von Bedeutung, wo beispielsweise bei Mobiltelefonen das Einzelgerät nur vergleichsweise geringe Metallgehalte

aufweist, so dass hier entsprechende Sammelmengen erforderlich sind, um ein wirtschaftliches Recycling zu ermöglichen. Die Sammlung hat unter Berücksichtigung der gesetzlichen Bestimmungen (z.B. ElektroG) zu erfolgen.

Voraussetzung für eine Verwertung z.B. von Elektroaltgeräten ist, dass enthaltene Schadstoffe bzw. schadstoffhaltige Bauteile im Rahmen der Erstbehandlung vor der weiteren Aufbereitung entfernt werden. In diesem Zusammenhang ist die im Folgenden beschriebene Analytik von besonderer Bedeutung. In dem darauffolgenden Aufbereitungsschritt geht es darum, die verschiedenen Verbunde im Abfall aufzutrennen. Hier kommen neuartige oder bestehende und modifizierte Verfahren – wie später beispielhaft beschrieben – zum Einsatz.

Die Qualitätskontrolle und Überwachung der erzeugten Sekundärrohstoffe ist besonders wichtig, damit eine Vermarktung möglich ist. Eine besonders große Rolle spielt dies bei mineralischen Abfällen, da hier Vertrauen bei den abnehmenden Stellen geschaffen werden muss.

2. Seltene Erden und Technologiemetalle

In den letzten Jahren hat ein Begriff in kürzester Zeit die Runde vor allem in der Abfallwirtschaft gemacht: die *Seltenen Erden*. Als *Öl der Zukunft* werden sie in der Literatur schon bezeichnet (www.selteneerden.de).

Leider werden häufig – auch in Fachpublikationen – diese besonderen Metalle mit anderen, technologisch ebenso wichtigen metallischen Rohstoffen, den Technologiemetallen, verwechselt.

Was sind nun Seltene Erden oder richtigerweise Metalle der Seltenen Erden und was sind Technologiemetalle?

Seltene Erden sind gar nicht so selten. Einige wie z.B. Cer, Yttrium oder Neodym kommen in der Erdkruste häufiger vor als beispielsweise Blei, Molybdän oder Arsen [11]. Man unterscheidet ferner leichte und schwere Selten-Erden-Elemente (Tabellen 2 und 3), die exakte Einteilung ist hierbei strittig.

Tabelle 2: Leichte Seltene Erden

Element	Symbol	Ordnungszahl
Scandium	Sc	21
Lanthan	La	57
Cer	Ce	58
Praseodym	Pr	59
Neodym	Nd	60
Promethium	Pm	61
Samarium	Sm	62
Europium	Eu	63

Tabelle 3: Schwere Seltene Erden

Element	Symbol	Ordnungszahl
Yttrium	Y	39
Gadolinium	Gd	64
Terbium	Tb	65
Dysprosium	Dy	66
Holmium	Ho	67
Erbium	Er	68
Thulium	Tm	69
Ytterbium	Yb	70
Lutetium	Lu	71

Die Gewinnung der Metalle der Seltenen Erden aus Roherz ist mit hohen Umweltbelastungen (Aufbereitungsrückstände, radioaktive Produkte) verbunden. Für die Rückgewinnung beispielsweise aus Elektroaltgeräten von Bedeutung ist der Umstand, dass die Metalle der Seltenen Erden chemisch sehr ähnlich sind.

Zu den Technologiemetallen, mitunter auch wirtschaftsstrategische Metalle genannt, zählen Elemente wie Indium, Gallium, Palladium, Germanium oder Tantal. Diese Rohstoffe sind für die Herstellung von High-Tech-Produkten unverzichtbar.

3. Chemikalienrecht versus Abfallrecht

Gem. § 3 Abs. 4 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes hat die Verwertung *ordnungsgemäß* und *schadlos* zu erfolgen. Dies bedeutet, dass eine Verwertung von Abfällen im Einklang stehen muss mit dem formellen und materiellen Recht. Das Chemikalienrecht hat Vorrang vor dem Abfallrecht. Eine Verwertung verbotener Gefahrstoffe ist nicht ordnungsgemäß und nicht schadlos und daher verboten. Verbotene Gefahrstoffe sollen durch Beseitigung (in der Regel Verbrennung) aus dem Wirtschaftskreislauf entfernt werden.

Bei der Verwertung von Abfällen ist neben dem Chemikaliengesetz (ChemG) und der Chemikalienverbotsverordnung (ChemVerbotsV) insbesondere die EU-Verordnung 850/2004 [10] (sogenannte POP-Verordnung) von Bedeutung.

Dieser Verordnung wurde bislang wenig Beachtung geschenkt. Erst durch die aktuelle Diskussion um den Flammhemmer Hexabromcyclododecan (kurz HBCD oder HBCDD genannt) ist die POP-Verordnung in den Fokus gerückt, und man hat die Bedeutung für die abfallwirtschaftliche Praxis erkannt.

Unter POP-Stoffen versteht man persistente organische Schadstoffe (persistent organic pollutants), also Stoffe, die langlebig und nicht bzw. äußerst schwer abbaubar sind. POP-Stoffe können außerdem bioakkumulierbar sein (reichern sich in Organismen an), haben sehr schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Tieren und/oder das Potential zum weiträumigen Transport (*grasshopper*-Effekt).

Die POP-Verordnung setzt das Stockholmer Abkommen und das Protokoll zum Genfer Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung betreffend POP um. Unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips werden In-Verkehr-Setzens- und Freisetzungsverbote sowie abfallrechtliche Maßnahmen festgesetzt.

Abfallwirtschaftlich relevant ist Artikel 7 in Verbindung mit den Anhängen IV und V. Abfälle, die POP-Stoffe über einer festgelegten Konzentration enthalten, müssen durch ein geeignetes Verfahren (in der Regel die Verbrennung) so behandelt werden, dass diese Stoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. Eine Verwertung von POP-Stoffen ist unzulässig.

Mit der aktuellen Änderung der Anhänge IV und V der POP-Verordnung 850/2004 durch die Verordnung 2016/460 wurde der Flammhemmer Hexabromcyclododecan (HBCDD) in die Liste der POP-Stoffe (Tabelle 4) aufgenommen.

Tabelle 4: Aktuelle Liste der POP-Stoffe gemäß EU-VO 850/2004

Stoff	Stoff
Tetra, Penta, Hexa, Heptabromdiphenylether (BDE's)	Alkane C ₁₀ -C ₁₃ , Chlor (kurzkettige chlorierte Paraffine, SCCP)
Perfluorooctansulfonsäure und ihre Derivate (PFOS)	Pentachlorbenzol (PeCB)
Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF)	Mirex
DDT (1,1,1-Trichlor-2,2-bis (4-chlorphenyl) ethan)	Polychlorierte Biphenyle (PCB)
Chlordan	Toxaphen
Hexachlorcyclohexane einschl. Lindan (α -, β -, γ -, δ -HCH)	Polychlorierte Naphtaline (PCN)
Dieldrin	Endosulfan
Endrin	Hexachlorobutadien (HCBD)
Heptachlor	Hexabromobiphenyl
Hexachlorbenzol	Aldrin
Chlordecon	Hexabromcyclododecan (HBCD/HBCDD)

Das Verständnis der beschriebenen chemikalienrechtlichen Vorschriften und deren Verknüpfungen mit dem Abfallrecht sind von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit der Verwertung von Abfällen, die Schadstoffe enthalten können.

4. Neuartiges Analysenverfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Zusammensetzung von Abfällen

Die Ermittlung der Zusammensetzung des Abfalls ist von besonderer Bedeutung im Hinblick auf eine Verwertung im Allgemeinen und eine hochwertige Verwertung im Besonderen.

Die bisherigen nasschemischen Analysen stellen lediglich eine *Momentaufnahme* dar. Außerdem wird selbst bei ordnungsgemäßer Probenahme immer von einer kleinen Probenmenge auf die Gesamtmenge des Abfalls geschlossen.

Abhilfe kann ein neuartiges Analysenverfahren schaffen, die Prompte-Gamma-Neutronen Aktivierungsanalyse (PGNAA).

Die PGNAA ist ein kernphysikalisches Verfahren zur Elementbestimmung, bei dem das zu analysierende Gut mit Neutronen bestrahlt wird (Bild 2). Hierbei wird die Energie, die beim Einfangen des Neutrons durch den Atomkern freigesetzt wird, durch sogenannte prompte Gammaquanten abgestrahlt. Die Energie dieser Promptgammastrahlung ist charakteristisch für jedes individuelle Element. Durch die Spektrenaufnahme während der Bestrahlung des Messguts und mathematischer Algorithmen kann auf die anteilige Masse eines jeden Elements geschlossen werden. Bei dem Verfahren erfolgt eine kurzzeitige Aktivierung; es entstehen aber keine radioaktiven Substanzen.

Die PGNAA ist höchst sensitiv (ppm-Bereich) und erlaubt eine zerstörungsfreie und schnelle qualitative und quantitative Bestimmung der Zusammensetzung von Produkten und Abfällen. Beispielsweise ist die Analyse von Elektroaltgeräten in Gitterboxen oder die Bestimmung der Zusammensetzung gepresster Metallpakete möglich.

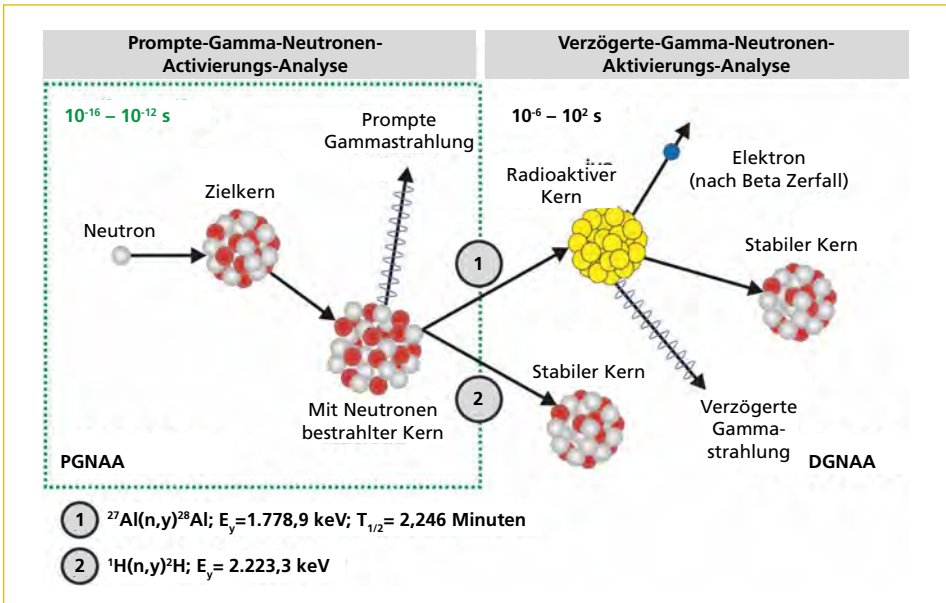


Bild 2: Prinzip der Prompten-Gamma-Neutronenaktivierungsanalyse

Quelle: AINT GmbH, Stolberg/Rheinland



Bild 3: Untersuchte 200 l-Fässer

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH



Bild 4: Versuchsanlage im Forschungszentrum Jülich

Quelle: Forschungszentrum Jülich GmbH

Das Verfahren wurde im Rahmen zweier Dissertationen am Forschungszentrum Jülich zur Untersuchung von 200 l-Fässern (Bild 3) mit radioaktiven Abfällen weiterentwickelt.

Die Versuchsanlage im Forschungszentrum Jülich ist in Bild 4 dargestellt.

Mit der PGNAA ist eine schnelle und zerstörungsfreie Untersuchung größerer Abfallmengen sowie kompletter Geräte (z.B. Elektroaltgeräte) und die quantitative und qualitative Elementanalyse möglich.

Außerdem dient die Analytik dazu, im Abfall möglicherweise enthaltene Schadstoffe (z.B. chlorierte oder bromierte Verbindungen) zu identifizieren, die eine Verwertung verhindern könnten. Wie bereits ausgeführt, hat das Chemikalienrecht Vorrang vor dem Abfallrecht. Schadstoffe im Abfall müssen erkannt und dauerhaft zerstört werden, damit eine Verwertung des Abfalls rechtlich zulässig ist. Insofern spielt die Schadstofferkennung im Rahmen der Erstbehandlung von Elektroaltgeräten eine entscheidende Rolle.

Im Gegensatz zur LaserInduzierten Plasma Spektroskopie (LIPS), engl. LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy), bei der lediglich die Oberfläche des Probenmaterials analysiert wird, erfolgt bei der PGNAA ein *Durchleuchten* der gesamten Probe. Zur Analyse von inhomogenen Materialien (z.B. Erze) erfordert LIPS eine aufwendige Probenvorbereitung.

Die PGNAA hat auch Vorteile gegenüber der Röntgenfluoreszenzanalyse, da auch die Bestimmung von Elementen mit niedriger Ordnungszahl (z.B. Wasserstoff oder Chlor) möglich ist. Halogene wie Chlor oder Brom (Flammhemmer) können mit der PGNAA sehr gut bestimmt werden. Dies gilt auch für Metalle der Seltenen Erden.

Im Rahmen des hochwertigen Recyclings von Elektroaltgeräten hat die Analytik mittels PGNAA verschiedene Aufgaben. Diese sind im Wesentlichen:

- Bestimmung der Zusammensetzung von Elektroaltgeräten und der Rohstoffgehalte,
- Identifikation von Schadstoffen vor der Materialaufgabe,
- Verwertungsorientierte Lenkung der separierten Stoffströme (z.B. Metalle der Seltenen Erden und der Technologiemetalle).

Die PGNAA dient ebenso dazu, verschiedene Metalllegierungen (z.B. Kupfer oder Stahl) anhand der Legierungsbestandteile in verschiedene Klassen zu differenzieren und den Weiterverarbeitungsbetrieben mit entsprechender Reinheit zur Verfügung zu stellen.

Die bisherige Erfassung von Metallschrotten ist mehr als unbefriedigend, wie Bild 5 zeigt. Eine Weiterverarbeitung mit dem Ziel der Erzeugung hochwertiger Rezyklate ist aufwendig und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses erheblich.



Bild 5:

Erfassung von Mischschrotten gemeinsam mit Elektroaltgeräten auf einem Wertstoffhof

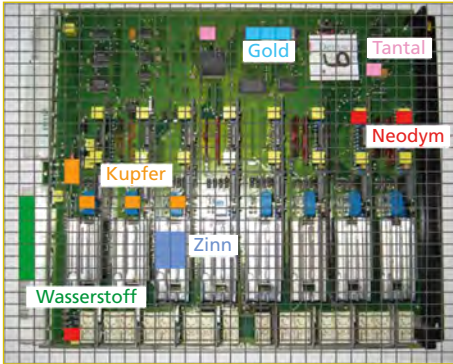


Bild 6: Identifikation von Rohstoffen auf einer Platine

Quelle: AINT GmbH, Stolberg/Rheinland

Durch die Vorabsortierung unter Einsatz der PGNAA-Technik wird das Metallrecycling verbessert. Die Einschmelzkosten in den Gießereibetrieben reduzieren sich beträchtlich, so dass dadurch der gesamte Recyclingprozess deutlich wirtschaftlicher wird. Mit Hilfe der Analytik sollen auch Rohstoffe beispielsweise in elektrischen oder elektronischen Geräten und Komponenten identifiziert werden (Bild 6).

Weitere mögliche Anwendungen der PGNAA-Technik liegen z.B. im Bereich der Detektion von Störstoffen in gepressten Metallen oder in der Untersuchung größerer, beispielsweise in Gitterboxen gesammelter Abfallmengen (Bild 7).



Bild 7:

Einige mögliche messtechnische Aufgabenstellungen

Quelle: AINT GmbH, Stolberg/Rheinland

5. Hochwertige Verwertung am Beispiel des Recyclings von Beton

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich etwa 280 Millionen Tonnen Bauschutt an. Der Anteil an Beton an dieser Menge betrug im Jahre 2010 etwa 130 Millionen Tonnen (etwa 46 %). Ein wirklich effizientes Recycling von Beton findet nicht statt. Vielmehr wird Beton nach dem Abbruch in stationären oder mobilen Brechanlagen zerkleinert, klassiert (abgesiebt) und vorwiegend im Straßen- und Wegebau als Füllmaterial eingesetzt. Dies ist Downcycling eines wertvollen Rohstoffes. Nur ein geringer Anteil an Betonbruch kann aus Gründen, die im Folgenden noch erläutert werden, als Betonzuschlag verwertet werden.

Beton ist ein Gemisch aus Zement, Kies (Zuschlag) sowie Wasser. Darüber hinaus werden für spezielle Anwendungen bestimmte Betonzusatzstoffe (z.B. Erstarrungsverzögerer, Verflüssiger oder Luftporenbildner) zugegeben.

Die Herstellung von Zement ist ein energieintensiver Prozess, der bei etwa 1.450 °C im Drehrohrofen stattfindet. Die Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen bei der Herstellung

von Zement sind beträchtlich. Die Herstellung von einer Tonne gebranntem Zementklinker aus Kalk, Ton und Sand setzt etwa 650 bis 700 kg CO₂ frei. Damit trägt die Zementindustrie zu etwa 8-15 % zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei.

Der Zement wird im Beton als Bindemittel eingesetzt, das die Kieskörner zu einem festen Gefüge verkittet. Die Festigkeit erlangt der Zement und damit auch der Beton durch die Ausbildung von sogenannten Calcium-Silikat-Hydratphasen (CSH-Phasen). Diese werden aus dem Zement durch Zugabe von Wasser gebildet. Der Prozess der CSH-Phasenbildung ist reversibel. Das heißt, er kann rückgängig gemacht werden, in dem das mineralogisch gebundene Kristallwasser wieder ausgetrieben wird. Dann ist der so behandelte Zement wieder reaktiv, d.h. er reagiert bei Wasserzugabe wieder zu Festigkeit bringenden Mineralien – ähnlich wie bei Stuck- oder Putzgips.

Das Austreiben des Wassers erfolgt bei etwa 850 °C, also bei deutlich geringeren Temperaturen als bei der Herstellung von Zement aus Primärrohstoffen. Allein aus Gründen des Klimaschutzes macht das Recycling des Betons und die Rückgewinnung des Zementes daher Sinn.

Beton ist also eine wichtige Rohstoffquelle.

Beim bisherigen *Recycling* wird der Beton zerkleinert. Die Trennung erfolgt innerhalb der schwächsten Komponente, der Zementmatrix, die im Innern des Betons nicht immer vollständig hydratisiert ist. Bei Zugabe des Betonbruchs als *Zuschlag* im Frischbeton kommt es zu Konsistenzproblemen. Das heißt, der Zement entzieht dem Betongemisch Wasser, um zu reagieren. Dadurch versteift sich der Beton erheblich, kann also nicht mehr ordentlich verteilt werden, beispielsweise beim Betonieren einer Decke auf der Baustelle.

5.1. Rückgewinnung der Komponenten Kies und Zement aus Beton

Ziel des hochwertigen Recyclings ist die sortenreine Rückgewinnung der im Beton enthaltenen Komponenten Zement und Kies (*Zuschlag*). Diese Komponenten sollen nach der Trennung und entsprechender Vorbehandlung wieder als Rohstoffe für neuen Beton verwendet werden.

Die Rückgewinnung von Kies und Zement aus dem Verbundsystem Beton beruht auf dem Grundprinzip der elektrodynamischen Fragmentierung. Das Prinzip wurde ursprünglich in Russland in den 40er Jahren entdeckt und im Karlsruher Institut für Technologie in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Unternehmen Selfrag weiterentwickelt.

Bei dem Verfahren werden mithilfe von ultrakurzen Hochspannungsimpulsen Verbunde getrennt und in ihre Einzelbestandteile zerlegt. Die Durchschlagsfestigkeit eines Materials gegenüber elektrischen Impulsen ist keine Konstante, sondern hängt von der Entladungszeit des Pulses ab (Bild 8).

Die elektrische Durchschlagsfestigkeit ist umgekehrt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit. Üblicherweise ist die elektrische Durchschlagsfestigkeit in Festkörpern wie Isolatoren höher als in Flüssigkeiten.

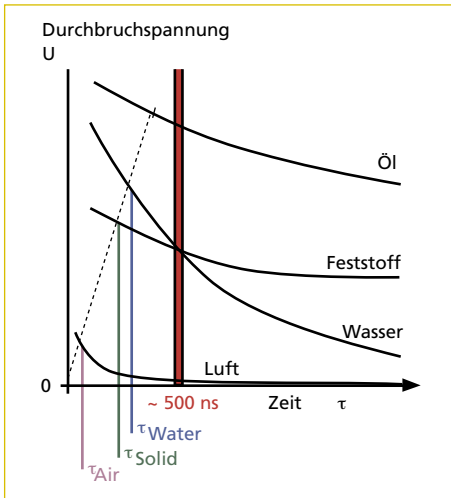


Bild 8: Durchschlagsfestigkeit in Abhängigkeit von der Entladungszeit des Pulses

Quelle: Selfrac AG

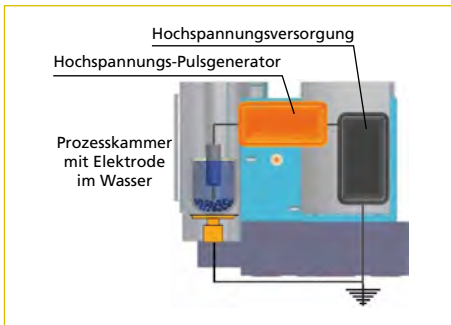


Bild 9: Hochspannungsimpulsgenerator mit Prozesskammer

Quelle: Selfrac AG

Technisch wird dieser Effekt beim Betonrecycling mit dem elektrodynamischen Verfahren genutzt, indem man den Beton unter Wasser zwischen zwei Elektroden platziert (Bild 9) und einen Hochspannungsimpuls mit einer sehr kurzen Entladungszeit (unterhalb 500 ns) auf den Beton einwirken lässt. Bei dieser sehr kurzen Pulszeit kehren sich die Verhältnisse um. Das Wasser wirkt wie ein Isolator und der Blitz verläuft entlang des Weges des geringsten Widerstandes durch den Beton entlang von Korngrenzen und nicht durch das Wasser.

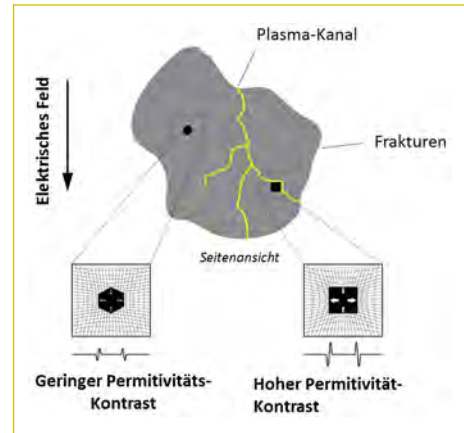


Bild 10: Ausbildung eines Plasmakanals

Quelle: Selfrac AG

Durch mehrere Funkenentladungen (Pulse) führt diejenige Entladung, welche zuerst die Gegenelektrode erreicht, zur Ausbildung eines Plasmakanals (Bild 10). Durch die Ausdehnung des Plasmakanals im Festkörper und das Verdampfen des Wassers wird eine Druckwelle von etwa neun bis zehn Giga Pascal (90.000 bis 100.000 bar) erzeugt [14].

5.2. Betonrecycling – ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung

Mit dem Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung können die im Beton enthaltenen Komponenten Kies und Zement selektiv zurückgewonnen werden. Mit der Rückgewinnung von hochwertigem Kies aus Beton ließe sich die Recyclingquote etwa verzehnfachen und auf bis zu 80 Prozent steigern [5].

Vorteile und Nutzen des neuartigen Recyclingverfahrens für Beton sind:

- Hochwertige und vollständige Verwertung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes,
- Verwertungslösung insbesondere auch für kontaminierte Betone und Vermeidung einer Deponierung von gefährlichen Abfällen (*Sonderabfällen*),
- Energieärmere Zementherstellung und Beitrag zum Klimaschutz,
- Reduzierung des Kiesabbaus und des Landschaftsverbrauchs,
- Sicherung von Arbeitsplätzen bzw. Schaffung von neuen Arbeitsplätzen,
- Kostensenkung bei Abbruchmaßnahmen durch kostengünstigere Verwertung.

Ein weiterer indirekter Vorteil des Recyclings von Beton ist der Wegfall der Kieswaschschlamm Entsorgung. Nach Krakow [3] fallen bei der Aufbereitung von Kies und Sand allein in Deutschland etwa 15 Millionen Tonnen (in Europa mindestens 50 Millionen Tonnen) feinteilige Aluminosilikate an, die überwiegend in Schlammteichen deponiert werden. Hinzu kommen noch etwa 150 Millionen Kubikmeter Wasser, das Jahr für Jahr im Schlamm gebunden ist.

5.3. Hemmnisse für ein hochwertiges Recycling

Bereits im Jahre 1998 hat das Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Runderlasses *Umweltschonendes Bauen* [9] die Verwendung von Recyclingbaustoffen festgeschrieben.

In diesem Runderlass heißt es: *Das Land hat eine wichtige Vorbildfunktion für das umweltschonende Bauen. Deshalb sind bei der Planung und Ausführung von Baumaßnahmen des Landes und bei der Unterhaltung der Grundstücke und baulichen Anlagen die Möglichkeiten intensiv zu nutzen, die die natürlichen Lebensgrundlagen Boden, Luft und Wasser schonen.*

Dieses Ziel soll u.a. erreicht werden durch

- die Wiederverwendung von Baustoffen und Bauteilen,
- die Verwendung von recycelfähigen und recycelten Baustoffen und Bauteilen.

Leider werden die Vorgaben des genannten Runderlasses aufgrund fehlenden Vollzuges nicht oder nur unzureichend umgesetzt. Und dies, obgleich die Regierungspräsidien bereits vor einiger Zeit die zuständigen Baubehörden angewiesen haben, diesen Runderlass anzuwenden. Die Akzeptanz für Recyclingbaustoffe ist gering. Auf den Lagerhöfen der Bauschuttrecycler häuft sich das rezyklierte Material, das dann mangels Abnehmer doch deponiert werden muss. Trotz Güteüberwachung sind die Behörden sehr zurückhaltend und schreiben lieber Primärkies aus. All das hat mit Kreislaufwirtschaft nichts zu tun.

Die Bundesregierung hat mit ihrem Ressourceneffizienzprogramm [8] die Weichen gestellt für eine ressourceneffiziente Wirtschaft. Den Worten müssen nun endlich Taten folgen.

Das Verfahren zur selektiven Rückgewinnung von Kies und Zement funktioniert. Es stellt sich die Frage, warum es nicht großtechnisch eingesetzt wird.

Die Erklärung ist einfach: Die Wirtschaft investiert nicht, solange die Rahmenbedingungen unklar sind und die Vermarktung des Kieses nicht gewährleistet ist. Ursachen sind in erster Linie die diffusen gesetzlichen Regelungen, die fehlende Akzeptanz bei den ausschreibenden Behörden und die erheblichen Defizite beim Vollzug bereits bestehender rechtlicher Vorschriften.

Seit Jahren bildet ein in der Fachwelt umstrittenes Merkblatt M20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) die Grundlage für die Verwertung mineralischer Abfälle. Wegen der erwähnten fachlichen Mängel wurde der Bundesgesetzgeber aufgefordert, eine bundeseinheitliche Regelung zu erarbeiten. Ein Arbeitsentwurf einer Ersatzbaustoffverordnung als Teil einer sogenannten Mantelverordnung liegt vor. Mit einem Inkrafttreten der Verordnung ist in 2017 zu rechnen.

Die Ersatzbaustoffverordnung enthält hohe Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Abfällen. In Fachkreisen wird gemutmaßt, dass die Recyclingquoten sinken werden. Mehr Material würde also anstatt in der Verwertung auf der Deponie landen.

Das beschriebene Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung gewinnt den Zuschlag Kies in sauberer Form, d.h. frei von Zementanhaftungen, zurück (Bild 11).



Bild 11:

Mittels elektrodynamischer Fragmentierung (Selfrag-Verfahren) zurückgewonnener Kies aus Beton

Durch ein Qualitätssicherungsverfahren soll der Nachweis erbracht werden, dass der Kies die bautechnischen Anforderungen von *Primärkies* erfüllt. Dadurch können die Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung erfüllt werden.

Die neuartige Technik steht zur Zeit aber noch im Wettbewerb mit Primärkies und mit Deponien. Der Preis für Kies aus der Primärrohstoffgewinnung ist mit durchschnittlich etwa 5,- EUR/t niedriger als die überschlägig ermittelten Recyclingkosten. In dem genannten Preis sind aber Folgen des Kiesabbaus wie Flächenverbrauch, Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse, Verlust an Lebensqualität etc. monetär nicht erfasst. Insofern sind die Vergleiche nicht wettbewerbsneutral [12].

Im Koalitionsvertrag [6] der rot-grünen NRW-Landesregierung ist die Einführung einer Kiesabgabe verankert. Diese wurde aber noch nicht eingeführt.

Durch eine bundesweite Lenkungsabgabe – wie sie auch das Forum für ökologische und Soziale Marktwirtschaft (FOES) fordert [13] – könnte der Preis für Primärkies angehoben werden; das Recycling hätte eine reelle Chance. Da diese Abgabe bundesweit den Preis des Primärrohstoffes erhöhen würde, würde der von der Kiesindustrie befürchtete und kritisierte *Kies-Tourismus* innerhalb Deutschlands nicht eintreten.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass das bisherige Recycling von Beton nur minderwertige Qualitäten erzeugt. Die Einsatzmöglichkeiten der Rezyklate sind begrenzt. Kontaminierter Beton wird nicht verwertet, sondern deponiert. Die genauen Mengen sind mit Unsicherheiten behaftet. Es bleibt abzuwarten, ob durch die geplante Ersatzbaustoffverordnung das Recycling mineralischer Abfälle vorangebracht oder eher zurückgedrängt wird. Schätzungen in neueren Veröffentlichungen lassen einen Rückgang der Verwertungsquote von neunzig Prozent auf siebzig Prozent erwarten. Diese Entwicklung läuft der Intention der neuen Abfallrahmenrichtlinie in Verbindung mit dem am 01.06.2012 in Kraft getretenen novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz zuwider. Hiernach soll das Recycling priorisiert werden.

Durch die Deponierung wertvoller Rohstoffe werden die Strategien zum Ressourcenschutz und zur Ressourceneffizienz ad absurdum geführt.

Mit dem neuartigen Recyclingverfahren wird Beton in seine Ausgangsbestandteile Kies, Sand und Zement zerlegt. Der Kies kann wieder zu neuem Beton verarbeitet, der Zement im Zementwerk eingesetzt oder zu hochfesten Formsteinen weiterverarbeitet werden. Im Falle des kontaminierten Betons finden sich die Schadstoffe im Zementstein, also in einer im Vergleich zum Anteil des Zuschlags geringen Menge.

Die Schadstoffe können aus dem Zementstein entfernt, bei Mineralölkontaminationen (Stichwort Tankstellensanierung bzw. sonstige Dichtflächen) werden die Ölanteile bei der Dehydratation des Zementsteins im Drehrohrofen zerstört. Im Vergleich zur Klinkerherstellung aus Rohmehl erfolgt die Dehydratation bei deutlich niedrigeren Temperaturen (etwa 800 °C anstelle von 1.450 °C).

6. Hochwertiges Recycling am Beispiel Elektroaltgeräte

6.1. Ist-Situation und künftige Entwicklungen

Das bisherige Recycling von Elektroaltgeräten beschränkt sich im Wesentlichen auf die leicht rückgewinnbaren Metalle Eisen/Stahl, Kupfer, Aluminium sowie auf Edelmetalle. Wirtschaftsstrategische Metalle oder Metalle der Seltenen Erden werden bislang nicht zurückgewonnen [7].

Beispielsweise werden Festplatten in den meisten Entsorgungsbetrieben zusammen mit anderen Geräteteilen einer mechanischen Zerkleinerung und Sortierung zugeführt. Ein Großteil der in Festplatten enthaltenen kritischen Rohstoffe (beispielsweise Seltene

Erden) geht im weiteren Prozess dissipativ verloren. Während die Verluste bei Edelmetallen auf über siebzig Prozent geschätzt werden, liegen die Verluste bei Seltenen Erden bei hundert Prozent, da die diese Rohstoffe enthaltenden Magnete in der Sortierung an Stahlteilen anhaften und somit vollständig in die Stahlfraktion sortiert werden

Im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm Progress II [8] ist unter Punkt 7.4.2 (Produktverantwortung stärken) zu lesen, dass zur *Stärkung der stofflichen Verwertung von Elektrogeräten [...] mittels einer Behandlungsverordnung verbindliche Behandlungsanforderungen* festgelegt werden sollen. Das bedeutet, dass in einer auf dem Elektrogerätegesetz (ElektroG) basierenden Verordnung künftig Kriterien enthalten sind, wie ein effizientes Recycling zu erfolgen hat. Hier geht es zum einen um die *Qualität*, d.h. Güte der Schadstoffentfrachtung im Rahmen der Vorbehandlung und zum anderen um die Effizienz der Rohstoffrückgewinnung.

6.2. Anlage zur hochwertigen Verwertung von Elektroaltgeräten

Die derzeit einzige Anlage zum hochwertigen Recycling von Elektroaltgeräten wurde von der Fa. Adamec Recycling GmbH nach über 15-jähriger Entwicklungsarbeit errichtet. Resultierend aus den Erfahrungen des Betriebes einer Technikumsanlage ist eine Anlage mit einem genehmigten Jahresdurchsatz von 35.000 Tonnen entstanden.

Mit dieser Anlage ist eine effiziente Rückgewinnung von Rohstoffen möglich. Neben FE- und NE-Metallen können auch Metalle der Seltenen Erden sowie weitere technologisch bedeutsame Metalle abgetrennt werden. Die zurückgewonnenen Kunststoffe werden in *flammhemmerhaltig* und *nicht flammhemmerhaltig* sortiert.

Mit Hilfe der PGNAA-Technik ist künftig eine noch differenziertere Lenkung der zurückgewonnenen Wertstoffströme möglich. Ferner können auch andere Verbunde getrennt werden, so dass auch weitere Einsatzmöglichkeiten mit dieser Recyclingtechnik gegeben sind.

Bild 12 zeigt die Anlage der Adamec Recycling GmbH, Bild 13 den Steuerstand der Anlage. Die Software zur Steuerung der Anlage wurde in Eigenregie entwickelt.



Bild 12: Anlage der Adamec Recycling GmbH zum hochwertigen Recycling

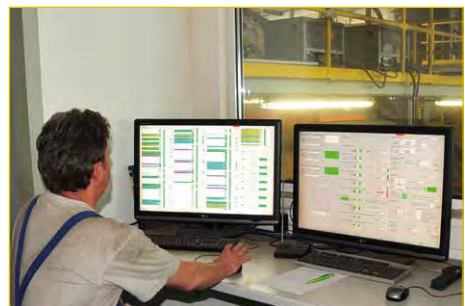


Bild 13: Steuerstand der Recyclinganlage

7. Zusammenfassung

Die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen und Maßnahmen zum Klimaschutz sind wichtige Herausforderungen unserer Zeit. Die bergmännische Gewinnung von Primärrohstoffen, beispielsweise von Erzen, ist zunehmend geprägt durch den Abbau von Armerzlagerstätten, also Rohstofflagerstätten mit vergleichsweise geringen Metallgehalten. Zur Rückgewinnung entsprechender Metallmengen müssen wiederum große Mengen an Erz gefördert, transportiert, zerkleinert und aufbereitet werden. Hierfür werden erhebliche Energiemengen benötigt. Die Rohstoffgewinnung ist mit hohen CO₂-Emissionen verbunden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Rückstände aus der Aufbereitung, die vielfach mit Schadstoffen belastet sind und zu Umweltschäden führen.

Diese Folgen der Rohstoffgewinnung und die sich ergebenden Kosten für die Beseitigung bleiben den Förderländern – vielfach Entwicklungs- und Schwellenländer – überlassen. Hieraus können sich Konflikte ergeben, wenn diesen Ländern das Gefühl vermittelt wird, dass sie von den reichen Industrienationen ausgebeutet worden sind.

Recycling kann einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten und im Rahmen einer *globalen Kreislaufwirtschaft* ebenso zu einer sozial verträglichen Rohstoffgewinnung beitragen, an der viele partizipieren. Ziel dieses Recyclings muss es sein, Rohstoffe mit hoher Effizienz aus Produkten jedweder Art zurückzugewinnen und diese Rohstoffe zurück in den Wirtschaftskreislauf zu führen.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss zum einen die Schadstoffproblematik im Blick sein. Eine Verwertung verbotener Gefahrstoffe ist verboten.

Zum anderen müssen die erzeugten Sekundärrohstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung den Anforderungen der nachfolgenden Weiterverarbeitungsbetriebe entsprechen. Hierzu sind ein enger Dialog mit diesen Betrieben und ein entsprechendes Konzept mit Maßnahmen zur Qualitätssicherung erforderlich.

In dem vorliegenden Beitrag wurde am Beispiel des Recyclings von Beton und Elektroaltgeräten gezeigt, dass entsprechende Verfahren und Anlagen zum hochwertigen Recycling existieren. Mit Hilfe eines neuartigen Analysenverfahrens können zum einen eine Identifikation von Schadstoffen und zum anderen eine verwertungsorientierte Lenkung von Stoffströmen erfolgen. Beispielsweise werden auch unterschiedliche Metalllegierungen nach ihren Legierungsbestandteilen separiert. Dadurch wird die Verwertung wirtschaftlicher. Mit Hilfe einer entsprechenden Qualitätssicherung wird der Nachweis erbracht, dass die technischen Anforderungen der weiterverarbeitenden Betriebe erfüllt werden.

8. Quellen

- [1] Ahrens, R. H.: Rechenschiebereien um Abfallquoten. VDI-Nachrichten, 7. Oktober 2016
- [2] Böckmann, C.: Wende dringend gefordert. VDI-Nachrichten, 2. Dezember 2016

- [3] Krakow, L.: Kieswaschschlämme als potenzielle Rohstoffquelle. Umwelt-Magazin, Heft 9/2011
- [4] Kühne, O.: Homepage des Lehrstuhls für Stadt- und Regionalentwicklung. Universität Tübingen
- [5] N.N.: Blitz, schlag' ein, Forschung Kompakt, Pressemitteilung des Fraunhofer Institutes für Bauphysik vom 01. Oktober 2012
- [6] N.N.: Koalitionsvertrag 2012-2017, Seite 72, Zeile 3334
- [7] N.N.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachbericht 38, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, 2012
- [8] N.N.: Ressourceneffizienzprogramm II der Bundesregierung, März 2016
- [9] N.N.: Runderlass III A4 -B1027 -1 - v. 21.12.1998 des Ministeriums für Bauen und Wohnen, zugleich im Einvernehmen mit dem Ministerpräsidenten und allen Landesministerien
- [10] N.N.: Verordnung (EG) 850/2004 über persistente organische Schadstoffe, zuletzt geändert durch die Verordnung (EU) 2016/460 der Kommission vom 30. März 2016
- [11] N.N.: Wikipedia, Metalle der Seltenen Erden, S. 1
- [12] Spoo, H.: Hochwertiges Recycling von Beton und Rückgewinnung von Kies und Zement. In: Kiesabbau – was bleibt? Interregionales Bürgerforum zum Kiesabbau – Ergebnisse und Perspektiven *Isselburger Signal*, Westarp Wissenschaften. Hohenwarsleben, 2013, S. 17-21
- [13] Spoo, H.: Besteuerung von Primärbaustoffen in Deutschland. Ein sinnvoller Beitrag zur Ressourceneffizienz? Vortrag auf der FOES-Veranstaltung, 05. Dezember 2011 in Berlin
- [14] Thome, V. et al.: Blitzrecycling. Recycling Magazin, Heft 1/2013
- [15] Weber, F.; Jenal, C.; Kühne, O.: Facetten und Sichtweisen zur Gewinnung mineralischer Rohstoffe. *Gesteins Perspektiven*, 3/2016