

Möglichkeiten und Grenzen des Recycling

Jan Henning Seelig, Thore Stein, Torsten Zeller und Martin Faulstich

1.	Möglichkeiten des Recycling.....	56
2.	Grenzen des Recyclings.....	57
2.1.	Der Rebound-Effekt.....	57
2.2.	Dissipative Verluste.....	57
2.2.1.	Verluste aufgrund thermodynamischer Eigenschaften.....	59
2.2.2.	Verluste aufgrund nicht nachhaltiger Produktgestaltung.....	60
2.2.3.	Verluste aufgrund bestimmungsgemäßen Gebrauchs	62
2.2.4.	Verluste durch Korrosion.....	62
2.2.5.	Verluste durch Abrasion	63
2.2.6.	Verluste aufgrund mangelhafter Sortier- und Sammelsysteme	63
3.	Zusammenfassung und Ausblick.....	64
4.	Quellen	67

Aus der stetig wachsenden Weltbevölkerung mit steigendem durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch [18] werden in naher Zukunft verschiedene Probleme hinsichtlich der Verfügbarkeit natürlicher Rohstoffe, insbesondere der Metalle, entstehen. Zum einen werden die Rohstoffe die Nachfrage nicht mehr decken können, zum anderen verursacht der zunehmende Aufwand des Primärabbaus starke ökonomische und ökologische Belastungen. Eine Möglichkeit, um diesem Trend entgegenzusteuern, ist die Etablierung verschiedener Recyclingsysteme. Ein verstärkter Einsatz von Recyclingmaterial ermöglicht das Schließen der Stoffkreisläufe, sodass wertvolle Rohstoffe einer erneuten Nutzung zugeführt werden können. Dies führt neben der Reduktion von Umweltauswirkungen [1] zu einer verstärkten wirtschaftlichen Unabhängigkeit von den rohstoffgewinnenden Staaten. Der Aspekt der Versorgungssicherheit der Wirtschaft steht dabei aktuell im Vordergrund. Recycling ist ein wichtiger Baustein der angestrebten umweltverträglichen Rohstoffpolitik, die laut Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) [18] in Zukunft durch ein System der zweifachen Entkopplung ermöglicht werden kann. Einerseits muss demnach das wirtschaftliche Wachstum von einem proportionalen Anstieg des nicht-energetischen Ressourcenverbrauchs entkoppelt werden. Das heißt, dass pro eingesetzter Rohstoffeinheit ein größerer wirtschaftlicher Nutzen geschaffen wird. Die zweite Entkopplung muss zwischen Rohstoffverbrauch und den dadurch verursachten spezifischen Umweltauswirkungen stattfinden, indem zum Beispiel strengere Auflagen die Materialeffizienz verbessern und damit sehr aufwendig zu erschließende Rohstoffvorkommen unangetastet bleiben.

Besondere Vorsicht ist bei der Einführung geeigneter Maßnahmen erforderlich, damit die erzielten Erfolge nicht durch Rebound-Effekte ins Gegenteil verkehrt werden [18]. Im Folgenden sollen zunächst die Möglichkeiten, die das Recycling von Metallen bietet, näher betrachtet werden. Anschließend sollen ebenso die Grenzen verdeutlicht werden, die deren dauerhafter Kreislaufführung im Wege stehen.

1. Möglichkeiten des Recycling

Auf dem Gebiet des Recyclings werden derzeit bereits große Erfolge erzielt. Metalle finden eine breite Anwendung in den verschiedensten Industriezweigen und haben gegenüber anderen Materialien den Vorteil, dass sie in der Theorie Recyclingprozesse ohne Qualitätsverluste durchlaufen können und somit immer wieder der industriellen Nutzung zugeführt werden können [27]. Das Recycling von Massenmetallen ist aufgrund steigender Energiepreise bereits heute sehr attraktiv [18]. Bei diesen führen hohe verfügbare Mengen und etablierte Techniken zu einer guten Verfügbarkeit recycelter Materials in ausreichender Qualität [49]. Positiv zu bewerten ist dabei der Energieaufwand. Beispielsweise spart die Verwendung von recyceltem Aluminium gegenüber der Primärproduktion 95 Prozent an Energie sowie 96 Prozent des CO_2 -Ausstoßes ein. Bei Kupfer liegen die Werte bei immerhin noch 71 Prozent bzw. 87 Prozent [20]. Diese Umweltvorteile können jedoch nur in dem Maße genutzt werden, wie recyceltes Material zur Verfügung steht.

Deutschland weist europaweit eine der höchsten Recyclingquoten auf (gemessen am Anteil der *einer stofflichen Verwertung* zugeführten Abfallmenge). Im Falle der Massemetalle Aluminium, Kupfer und Zink werden auf diese Weise bereits über fünfzig Prozent der in Deutschland produzierten Menge aus recycelten Ausgangsstoffen gewonnen [18]. Bei den Edel- und Technologiemetallen liegen die Raten meist deutlich niedriger [48]. In der Realität sind der erneuten Nutzung der Rohstoffe meist Grenzen gesetzt. Für viele Metalle (hauptsächlich Edel- und Technologiemetalle) fehlen oft geeignete Kreislaufsysteme, obwohl das technische Know-How zum Recycling dieser Materialien bereits vorhanden ist [48]. Ein Beispiel sind etwa Elektro- und Elektronikgeräte, die eine ganze Reihe wertvoller Metalle enthalten, insgesamt jedoch niedrige Rücklaufquoten aufweisen [8]. Da der Engpass in diesem Fall in der Erfassung der Materialströme liegt, können entsprechende Anreize zu einer verstärkten Kreislaufführung beitragen. Die Einführung von Pfandsystemen ist beispielsweise ein geeignetes Mittel, das bereits zu der Erschließung von Materialressourcen in Abfallströmen beigetragen hat. Ein Positivbeispiel ist das Einwegpfand auf Getränkedosen, das zu einer deutlichen Erhöhung der Erfassungsquote führt [25]. Im Bereich des Elektro- und Elektronikschrottes könnten durch ein derartiges Pfandsystem ebenfalls gute Erfolge erzielt werden [41].

Auch im Bereich des Altautorecyclings gibt es Möglichkeiten, um die enthaltenen Metalle als hochwertigen Rohstoff zurückzugewinnen. Wilts et al. [48] führen in diesem Zusammenhang beispielsweise das niederländische System auf, bei dem durch den Aufbau eines Rücknahmenetzes in Kombination mit der Zertifizierung der Demontagebetriebe sehr gute Erfolge erzielt werden konnten. Die Demontage wird dabei durch ein Prämiensystem belohnt, welches die Demontage finanziell interessant macht.

In Deutschland hingegen stehen der qualitativ hochwertigen Rückführung die relativ hohen Schrottpreise im Wege, die eine minderwertige Verwertung rentabel machen [48]. Nach dem Durchlaufen dieser Verwertung stehen einige der Metalle demnach nicht mehr in ausreichender Qualität zur Verfügung, um Metallkontingente aus der Primärproduktion zu substituieren. Durch entsprechende politische Lenkungsmaßnahmen könnte demnach auch in Deutschland vorhandenes Recyclingpotenzial besser ausgeschöpft werden.

2. Grenzen des Recyclings

2.1. Der Rebound-Effekt

Anhand der beschriebenen positiven Auswirkungen wird deutlich, dass Recycling ein Kernprinzip zum Erreichen der Entkopplung zwischen Wirtschaftswachstum und Umweltauswirkungen darstellt. Doch trotz des auf breiter Basis vorhandenen Bewusstseins verhindern in der Realität verschiedene Mechanismen die vollständige Kreislaufführung sämtlicher Metalle. Ein wichtiger Faktor ist dabei der sogenannte Rebound-Effekt, der in verschiedensten Bereichen wie der Energieeffizienz, dem Verkehrsaufkommen oder der Ressourceneffizienz auftritt [22, 36, 42].

Hinsichtlich der Ressourceneffizienz bezeichnet Rebound den Effekt, dass die durch technischen Fortschritt erzielten Effizienzverbesserungen auf verschiedensten Gebieten durch insgesamt steigende Produktion relativiert oder sogar ins Gegenteil verkehrt werden. Begründet liegt dies in einer mit der Effizienzsteigerung oftmals einhergehenden Preisreduktion, die wiederum zu einer erhöhten Nachfrage nach den entsprechenden Produkten führen kann. Andererseits führen die Effizienzsteigerungen auch zu einer Erhöhung des Realeinkommens, was den erhöhten Konsum weiterer Produkte zur Folge hat [18]. Ein Beispiel liefern die Mobiltelefone, die durch stetige Gewichtsreduktion der Einzelgeräte ein hohes Einsparpotenzial aufweisen, das jedoch durch gesteigerte Verkaufszahlen überkompensiert wird [39]. Um zu erreichen, dass eine Verbesserung der spezifischen Effizienz auch zu einer Verbesserung der Gesamteffizienz führt, wäre es denkbar, dem durch Effizienzverbesserungen gesteigerten Konsum durch geeignete preisliche Instrumente entgegenzuwirken.

Vor dem Hintergrund des Rebound-Effekts darf auch nicht außer Acht gelassen werden, dass Effizienzverbesserungen auf einer Ebene zu Verschlechterungen der Materialeffizienz auf einer anderen Ebene führen können. So führt etwa Miniaturisierung zu einer Reduktion des Materialaufwandes, verhindert jedoch schnell die effiziente Rückgewinnung der eingesetzten Materialien beim Recycling [18]. Derartige Effekte sind daher bei der Etablierung von Effizienzsteigerungen im Vorfeld zu überprüfen, sodass diesen durch entsprechende Maßnahmen entgegengewirkt werden kann.

2.2. Dissipative Verluste

Eine nicht unerhebliche Menge an Metallen wird durch Verluste unwiederbringlich dem Stoffkreislauf entzogen. Dies kann in der Rohstoffgewinnung, der Grundstoffproduktion sowie allen Lebenszyklusphasen eines Produktes (Produktion, Nutzung,

Entsorgung) auftreten. Die Gründe hierfür sind vielfältig und nicht einfach zu erfassen. Neben gänzlichen Verlusten der Metalle durch Dissipation, z.B. bei der Nutzung und wegen ungenutzter Rückstände im Abraum der Bergbauindustrie oder in Schlacken, kommt es auch in Recyclingprozessen zu funktionellen Verlusten, indem etwa Metalle in großskalige Ströme anderer Metalle gemischt werden, aus denen eine Wiedergewinnung praktisch unmöglich ist [27].

Eine effiziente Rückführung in die Stoffkreisläufe ist bei zahlreichen Rohstoffen gegenwärtig nicht gegeben, die Recyclingraten liegen bei vielen Metallen im einstelligen Bereich [26]. Betroffen sind insbesondere die sogenannten Hochtechnologiemetalle, zu denen auch seltene Erden gehören. Gerade diese, zum Teil nur in sehr geringen Mengen und dissipativer Verwendungsstruktur [3] zum Einsatz kommenden Metalle, haben einen hohen Wert für die Wirtschaft, die von Importen und den somit diktierbaren Preisen abhängig ist. Die primäre Gewinnung dieser Metalle, und insbesondere der dazu gehörigen seltenen Erden, geht außerdem mit einem extrem hohen Ressourcen- und Energieaufwand einher. In Anbetracht der momentan stattfindenden Energiewende darf zudem nicht unbeachtet bleiben, dass Hochtechnologiemetalle verstärkt in der Produktion von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen verwendet werden [35]. Eine effizientere Rückgewinnung bzw. Rückführung von Metallen in den Stoffkreislauf wäre daher sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht von großem Nutzen.

Derzeit wird trotz vielfältig verfügbarer Forschungsarbeiten zur recyclingfreundlichen Produktgestaltung [11, 44, 54] dieser Aspekt in der Herstellung nicht auf breiter Basis berücksichtigt [40]. Absatzsteigerung und Gewinnmaximierung stehen bei der Produktentwicklung deutlich im Vordergrund. Einwegprodukte, kurze Produktlebensdauer, nur unter hohem Aufwand zu trennende Stoffgemische und ein *schlechtes Produktdesign* sind mitunter Gründe für den Verlust von Metallen. Gerade deren weitgestreuter Einsatz, oftmals in Kleinstmengen (z.B. in der Elektrotechnik), gestaltet eine Erfassung der Verluste äußerst schwierig und lässt diese häufig nur ungenau zu. Die lückenhafte Datenlage verhindert eine genaue Abschätzung der vorhandenen Mengen und Konzentrationen und erschwert dadurch die Entwicklung möglichst effizienter Rückgewinnungsstrategien. Speziell die dissipativen Verluste sind nur schwer zu ermitteln. Erste Ansätze zu diesem Thema sind in einigen Teilbereichen der Werkstoffverarbeitung bekannt, so etwa in der Automobilindustrie, die sich hinsichtlich der Metalle zum Beispiel mit Verlusten aus Brems- und Reifenabrieb beschäftigt. Außerdem verfolgt die Agrarforschung Ansätze um dissipative Verluste von Pflanzennährstoffen zu vermeiden. Eine weitergehende Forschung auf diesem Gebiet ist zur Quantifizierung der Verluste nötig.

Die Klassifikation der dissipativen Verlustmechanismen von Metallen ist der grundlegende Schritt um Verluste aufzudecken, zu quantifizieren und schließlich entsprechende Vermeidungsstrategien zu entwickeln. Nachfolgend soll eine Systematik der möglichen Ursachen für dissipative Verluste vorgestellt werden (Bild 1). Die Mechanismen werden folgend anhand von Beispielen näher erläutert. Die Unterteilung erfolgt dabei in sechs Verlustkategorien, welche in den unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus angesiedelt sein können.

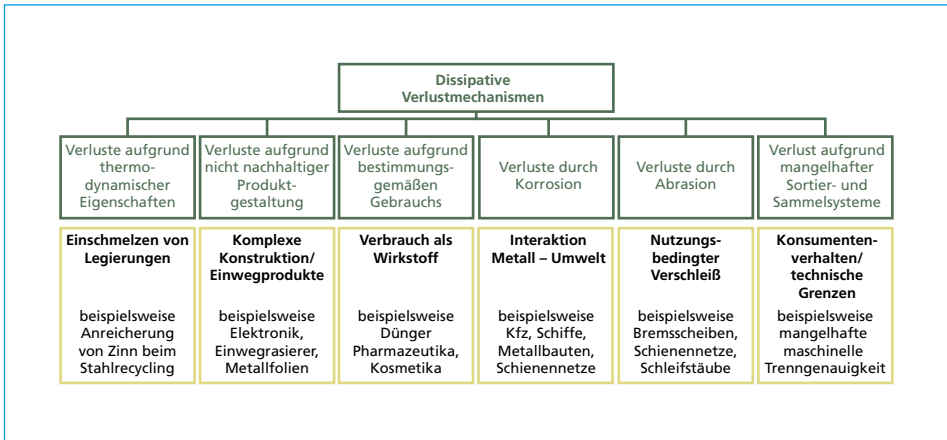


Bild 1: Systematik dissipativer Verlustmechanismen

2.2.1. Verluste aufgrund thermodynamischer Eigenschaften

Diese Art des dissipativen Metallverlustes tritt zum Beispiel in der Wiederaufbereitungsphase auf, bei der aus einem erfolgreich zurückgeführten und sortierten Stoffstrom Rohmaterialien zurückgewonnen werden. Betroffen sind unter anderem die in geringen Mengen enthaltenen Legierungselemente. Verschiedene Verlustmechanismen führen dabei entweder zu gänzlichem Verlust von Metallanteilen aus dem Produktzyklus oder zu den bereits erwähnten funktionellen Verlusten. Beide Mechanismen sollen folgend anhand von Beispielen näher beleuchtet werden.

Funktioneller Verlust

Funktionelle Verluste treten auf, wenn sich Materialien zwar noch im Verwendungskreislauf befinden, diese aber nicht mehr das gleiche Anwendungsspektrum aufweisen, welche die Materialien in ihrer ursprünglichen bzw. reinen Form aufweisen. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn Metalllegierungen nicht vollständig getrennt werden. Ein Beispiel ist das Recycling von Zinn.

Zinn wird bei der Herstellung von Weißblechdosen als Beschichtung in großem Maßstab verwendet. Das Recyclingsystem ist durch die Sammlung über das Duale System bzw. das Pfandsystem flächendeckend etabliert und erreicht hohe Rücklaufquoten von weit über neunzig Prozent [24]. Das so zurückgewonnene Weißblech wird nach teilweise erfolgter Entzinnung mittels Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen, wobei einzelne Legierungspartner aus dem Stahl durch Verdampfen zurückgewonnen werden. Aufgrund des hohen Siedepunktes von Zinn (2893 K) verbleiben die vorhandenen Anteile in dem zurückgewonnenen Eisenmetall. Dies ist nicht nur aufgrund des stetigen Verlustes an Zinn problematisch, sondern auch für die Nutzung des Eisenmetalls. Bei vollständiger Rückführung der so erhaltenen Metallmischung in die Stahlerzeugung kommt es auf Dauer zu einer Anreicherung in den produzierten Stahlsorten, wodurch die Stahlqualität sinkt. Eine ähnliche Problematik besteht im Fall von Kupfer [46].

Vollständiger Verlust

Für die Rückgewinnung von Zink aus zinkhaltigen Stahlwerksstäuben, Schlämmen oder Filtrerrückständen wird das sogenannte Wälzverfahren angewandt. Dabei wird das metallhaltige Material einem Drehrohrofen, dem Wälzofen, zugeführt. Im Vorfeld kann eine Anreicherung mit einem Schlackebildner und einem kohlenstoffhaltigen Material sowie eine Pelletierung vorgenommen werden. Der Kohlenstoff erfüllt eine zweifache Funktion, sowohl als Energieträger als auch als Oxidationsmittel. Unter Zufuhr thermischer Energie werden in dem Wälzofen Zinkverbindungen reduziert. Schließlich tritt das Zink in die Gasphase über, in der es bereits in dem Ofen erneut oxidiert wird. Das entstandene Zinkoxid wird anschließend einer weiteren Aufbereitung zugeführt [5]. Der Wirkungsgrad der Zinkgewinnung liegt bei diesem Verfahren bei etwa 95 Prozent, die übrigen etwa fünf Prozent verbleiben in der Wälzschlacke. Da diese niedrige Konzentration der Wirtschaftlichkeit einer weiteren Aufarbeitung bisher im Wege steht, wird die Schlacke momentan deponiert oder als Füllmaterial im Straßenbau verwendet [45]. Die enthaltenen Zinkanteile sind für die angestrebte nachhaltige Kreislaufwirtschaft verloren. Bei anderen Verfahren kann der Zinkgehalt in der Asche bzw. Schlacke noch wesentlich höher liegen [51].

Wie bei der Verarbeitung von Metallen im Wälzofen, fallen auch im zuvor erwähnten Elektrolichtbogenofen Schlacken an. Diese enthalten ebenfalls eine ganze Reihe verschiedener Metalle wie Barium, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Vanadium, Wolfram und Zink, die bei der Nutzung der Schlacken im Straßenbau [38] aus dem Materialkreislauf ausscheiden. Zur Verringerung metallischer Verluste in Schlacken wurden im Labor-, Technikums- und Industriemaßstab bereits neue Verfahrenswege erfolgreich getestet [19, 50, 52, 53]. Diese gilt es zukünftig in die Praxis zu implementieren. Eine vollständige Vermeidung der Verluste ist nach momentanem Stand der Technik nicht zu realisieren.

2.2.2. Verluste aufgrund nicht nachhaltiger Produktgestaltung

Die Reduzierung dissipativer Verluste kann seitens der Industrie bereits bei der Gestaltung von Produkten realisiert werden. Dabei stehen zwei Aspekte im Fokus. Zum einen hat die Lebensdauer der Produkte einen entscheidenden Einfluss auf den verursachten Materialverlust, zum anderen sind die verwendeten Materialmengen und die Komplexität des Aufbaus ausschlaggebend.

Lebensdauer

Die Lebensdauer eines Produktes kann die Zyklusdauer, den ein Rohstoff zum Durchlaufen eines Verwendungszyklus benötigt, stark beeinflussen. Gebrauchsgegenstände können durch sorgfältige Produktgestaltung eine wesentlich längere Nutzungsdauer erreichen. Dabei ist nicht nur die Robustheit eines Produktes relevant. Auch funktionstüchtige Gebrauchsgüter werden aus der Nutzung genommen, etwa wenn die Zeitlosigkeit des Produktdesigns nicht gegeben ist, oder die technische Entwicklung eine weitere Nutzung erschwert. Letzteres ist verstärkt auf dem Elektronikmarkt der Fall. Computer werden beispielsweise häufig durch neuere Modelle ersetzt, da die

von aktuellen Programmen benötigte Rechenleistung die Kapazitäten der alten Geräte übersteigt. Die Lebensspanne von Computern nimmt darüber hinaus stetig ab, wie eine Studie über die Jahre 1985 bis 2000 nachweist [4]. Bei Mobiltelefonen ist ebenfalls eine beschleunigte Austauschrate zu verzeichnen [7].

Ein Extrem hinsichtlich der Lebensdauer sind Einwegprodukte wie Einwegrasierer, Kugelschreiber und Metallfolien. Bei der Entsorgung können die enthaltenen Metallanteile aufgrund physikalischer Eigenschaften, wie etwa der Partikelgröße, oft nicht erfasst werden und tragen daher vermehrt zu den dissipativen Verlusten bei. Dieser Kategorie sind auch RFID-Tags zuzurechnen. Bei zukünftig verstärktem Einsatz ist einerseits mit erhöhtem Verlust der enthaltenen Metalle zu rechnen, andererseits führt dies zu einer Verunreinigung von Stoffströmen in etablierten Recyclingverfahren [14].

Produktgestaltung

Neben den erwähnten Designaspekten spielt die Produktgestaltung auch hinsichtlich der Erweiterbarkeit und Demontierbarkeit eine große Rolle. Erweiterbarkeit kann beispielsweise durch modularen Aufbau [30] realisiert werden. Durch den Austausch einzelner Module eines Gerätes kann einerseits die Aktualität (z.B. durch Erhöhen der Rechenleistung eines Mobiltelefons) verlängert werden, andererseits können voraussichtlich ungenutzte Module von Beginn an weggelassen werden (z.B. Kamera im Mobiltelefon). Dabei ist im Einzelfall die ökologische Sinnhaftigkeit zu prüfen, da ein modularer Aufbau oft auch mit erhöhtem Materialaufwand einhergeht. Ein Rebound-Effekt wäre außerdem durch den gegenüber einem vollständigen Gerät geringeren Preis eines einzelnen Moduls zu befürchten, der die Nutzungsdauer der Module mit Anteilen strategischer Metalle stark herabsetzen könnte.

Nach Ablauf der Nutzungsphase eines Produktes ist die Demontierbarkeit eine wichtige Voraussetzung, um enthaltene Materialien möglichst sortenrein einer Folgenutzung oder der Wiederaufbereitung zuzuführen. Eine gute Demontierbarkeit reduziert die dabei entstehenden Kosten [32], was bei identischem Aufwand eine feinere Auftrennung der Materialströme erlaubt. Gerade komplex aufgebaute Produkte, wie etwa Notebooks oder Smartphones, die eine ganze Reihe strategischer Metalle enthalten [8], verhindern oftmals eine schnelle und effektive Separation.

Eine gute Demontierbarkeit ist schon während der Nutzungsphase ein wichtiger Aspekt, da diese Einfluss auf die Reparaturfähigkeit hat und somit die Nutzungsphase deutlich verlängern kann. Dabei sind Produkte so zu gestalten, dass Baugruppen mit potenziell kurzer Lebensdauer leicht zugänglich sind. Der finanzielle Aufwand für die Reparatur kann somit gering gehalten werden, was den Nutzer die Reparatur einer Neuanschaffung vorziehen lässt. Ein Negativbeispiel der Demontierbarkeit sind beispielsweise Lichtquellen mit fest verbauten Leuchtmitteln, die vermehrt auf dem Markt erhältlich sind.

Hinsichtlich der Produktgestaltung darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die beste Vermeidungsstrategie für dissipative Verluste die Nutzungsvermeidung ist. Es ist bei der Produktentwicklung bestmöglich zu prüfen, ob einzelne Materialien nicht durch andere Materialien ersetzt werden können, die eine geringere wirtschaftsstrategische Relevanz beziehungsweise einen geringeren ökologischen Fußabdruck aufweisen.

2.2.3. Verluste aufgrund bestimmungsgemäßen Gebrauchs

Metalle, die aufgrund bestimmungsgemäßen Gebrauchs dissipativ aus der Nutzung ausscheiden, gelangen bereits in feinsten Zerkleinerung in den Handel. Beispiele sind Metalle, die als Bestandteil von Dünge- oder Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft Verwendung finden – und somit aktiv in der Natur verteilt werden – aber auch Kosmetikprodukte und Pharmazeutika sowie Farben und Lacke.

Düngemittel sollten im Idealfall nur in einer Dosierung ausgebracht werden, die im Jahresmittel dem Austrag durch die geernteten Pflanzen entspricht. Durch suboptimale Bodenbewirtschaftung oder klimatische Extremereignisse kann es jedoch zu starken Austrägen der Nährstoffe aus den Landwirtschaftsflächen und verstärkten Einträgen der Nährstoffe in Grund- und Oberflächenwasser kommen. Dazu trägt auch der Rückgang der Humusanteile in den Ackerböden [16] bei, der mit dem Bindevermögen der Böden korreliert. Ein geringeres Bindevermögen macht einen dauerhaft erhöhten Düngemiteleinsatz erforderlich. In Mineraldüngern befinden sich neben Kalium, Calcium und Magnesium, die als Makronährelemente zu großen Anteilen vorhanden sind, weitere Metalle, wie z.B. Eisen, Cobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän oder Zink, die die Pflanzen als Mikronährstoffe oder Spurenelemente benötigen [2].

Pharmazieprodukte aus der Humanmedizin und Kosmetika können ebenfalls metallische Verbindungen enthalten (am offensichtlichsten Eisen-, Zink- oder Magnesiumpräparate). Die Präparate oder deren Rückstände gelangen nach ihrer Verwendung mit dem Grau- und Schwarzwasser in die Kanalisationssysteme. Im Idealfall durchläuft dieses zunächst die verschiedenen Stufen einer Abwasserbehandlungsanlage, in der Teile der gelösten Metalle dem Wasser entzogen werden können und sich dabei im Klärschlamm anreichern. Metallrückstände, die sich nach der Behandlung noch im Wasser befinden, werden dem natürlichen Wasserkreislauf zugeführt. Da sich in Klärschlämmen neben den tendenziell wachstumsfördernden Elementen auch Schwermetalle befinden, unterliegt deren Nutzung als Landwirtschaftsdünger einer Regelung durch die EU-Gesetzgebung [15]. Ein großer Anteil der Klärschlämme wird in Folge dessen derzeit thermisch verwertet. Für die Nutzung der dabei erhaltenen metallreichen Aschen gibt es eine Reihe unterschiedlicher Ansätze [13], die jedoch alle den Verlust der enthaltenen Metalle zur Folge haben. Metallrückgewinnung aus Klärschlämmen ist momentan noch nicht Stand der Technik, beginnt jedoch in zunehmendem Maße in die Forschung Einzug zu erhalten. Die Recyclingansätze zielen beim Klärschlamm bisher auf die Rückgewinnung des Phosphors als Düngemittel ab [13].

2.2.4. Verluste durch Korrosion

Materialverluste durch Korrosion sind das bekannteste Beispiel unter den dissipativen Verlustmechanismen. Die Korrosion von Metallen hat ihre Ursache darin, dass sich Metalle in dem reduzierten Zustand, in dem sie den Hochofen verlassen und schließlich zum fertigen Produkt weiterverarbeitet werden, in einem labilen, energiereichen Zustand befinden. Nach den Gesetzen der Entropie strebt alles in der Natur einen stabilen, energiearmen Zustand an. Diesen können die Metalle durch oxidative Prozesse

erreichen [17]. Zwei unterschiedliche Mechanismen sind dabei möglich – chemisch oder biogen induzierte Korrosion. Erstere wird allein durch Umgebungseinflüsse verursacht, während zu der biogen induzierten Korrosion bakterielle Stoffwechselfvorgänge beitragen, die den Prozess zusätzlich beschleunigen können [29]. Durch Korrosion werden verschiedenste Maschinen, Gebäude und wichtige Elemente der Infrastruktur zersetzt. Als Beispiele seien an dieser Stelle Kraftfahrzeuge, Schiffe, Brücken, Metallgebäude, Bahnschienenetze usw. genannt.

Vor diesem Hintergrund ist schnell ersichtlich, dass Korrosion einen enormen Wirtschaftsfaktor darstellt. So ergab zum Beispiel eine Studie [33], dass in den Vereinigten Staaten jährlich durch korrosive Prozesse direkte und indirekte wirtschaftliche Kosten in Höhe von 552 Milliarden US-Dollar entstehen. Diese Summe entsprach sechs Prozent des damaligen Bruttoinlandsproduktes.

2.2.5. Verluste durch Abrasion

Unter Abrasion versteht man den nutzungsbedingten Verlust durch die Einwirkung von Reibungskräften und damit einhergehender Ritzung und Mikrozerspannung von Materialoberflächen. Beispiele für diese Art dissipativen Verlustes sind Schleifstäube sowie abrasiver Verschleiß im Verkehrssektor [43]. Metallpartikel gelangen beim abrasiven Verlust in Form feinsten Stäube in die Umwelt, reichern sich am Rand der Verkehrswege an oder werden durch Wettereinflüsse verschleppt. Neben der Problematik des Materialverlustes entstehen durch die Partikelemissionen außerdem Gesundheitsbeeinträchtigungen für den Menschen [31, 34].

Als beispielhafte Studie sei die INFRAS-Studie *PM10-Emissionen Verkehr* [28] genannt, die sich mit den Feinstaubemissionen des schweizerischen Schienenverkehrs befasst. Die Abrasion geschieht demnach an vielfältigen Punkten – Bremsen (sechzig Prozent), Räder (24 Prozent), Schienen (14 Prozent) sowie an den Fahrdrähten (zwei Prozent). Güter- und Personenverkehr verursachten dabei mit 47 Prozent zu 53 Prozent Emissionen in nahezu gleichem Ausmaß. Die Hochrechnung ergab Materialverluste in Höhe von 800 bis 1.300 Tonnen pro Jahr im gesamten schweizerischen Schienennetz [28]. Den am stärksten ausgeprägten Anteil an den Staubemissionen im Schienenverkehr trägt dabei Eisen (> 75 Prozent), weitere enthaltene Metalle sind zum Beispiel Blei, Kupfer, Mangan, Nickel, Chrom und Zinn [9].

2.2.6. Verluste aufgrund mangelhafter Sortier- und Sammelsysteme

Bei den Sortier- und Sammelsystemen zur Wiedergewinnung von Rest- und Abfallstoffen besteht nach wie vor ein großer Verbesserungsbedarf. In Bezug auf das Recycling von Metallen sind die wichtigsten Produktkategorien Batterien, Getränkebehälter, Konservendosen, Elektro- und Elektronikgeräte sowie Kraftfahrzeuge. Strategische Metalle sind bei den genannten Kategorien verstärkt in Produkten der Gruppe IKT (Informations- und Kommunikationstechnologie) zu finden.

Offene Verwendungszyklen können seitens der Sortier- und Sammelsysteme auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden.

Die Bandbreite der Probleme reicht dabei vom schlichten Fehlen solcher Systeme (vgl. [25]) über eine unzureichende Information der beabsichtigten Nutzer oder die ungünstige Positionierung der Sammelstellen bis hin zu ineffektiven maschinellen Sortiersystemen [47]. Durch schlechte Auftrennung einzelner Materialkategorien findet keine ausreichende Vorkonzentration der Wertstoffe statt, wodurch eine anschließende Separation einzelner Rohstoffe verhindert werden kann.

Wo Recyclingsysteme bereits bestehen, können diese oft mit der steigenden Komplexität der auf dem Markt befindlichen Technik nicht mithalten. Dies bezieht sich sowohl auf den Aufbau, als auch auf die reine Zahl der verwendeten Elemente. In Schwellenländern etwa sind durch die expandierende Wirtschaft IKT-Geräte weit verbreitet, bevor es zu einer Etablierung geeigneter Sammelsysteme kommt, wodurch die Rücklaufquote gegen Null tendiert. Aber auch in hochindustrialisierten Ländern ist die derzeitige Lage nicht bedeutend besser. Am Beispiel der Smartphones und Mobiltelefone wird die Problematik der mangelhaften Sammelsysteme besonders deutlich. In diesen Geräten findet sich eine ganze Reihe verschiedener Metalle, darunter viele edle und kritische Metalle. Die Edelmetalle Silber, Gold und Palladium können, einmal erfasst, zu einem relativ hohen Prozentsatz (95 Prozent) zurückgewonnen werden. Auch für das in den Lithiumionen-Akkumulatoren enthaltene Kobalt sind ähnliche Rückgewinnungsraten möglich. Neben den genannten Metallen sind beispielsweise auch Gallium, Indium, Niob, Tantal, und seltene Erden wie Neodym und Praseodym enthalten [8]. Obwohl in Deutschland die Rücknahme und Entsorgung der Mobiltelefone und Smartphones durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) seit dem Jahr 2005 gesetzlich geregelt ist, beträgt die Rücklaufquote lediglich fünf Prozent [8, 10]. Für gebrauchte Mobiltelefone existiert eine ganze Reihe verschiedener Sammelsysteme [37], deren Effektivität weniger von der Art des Systems an sich abhängt, sondern eher von einer guten Informationslage seitens der Nutzer und vor allem einer leichten Zugänglichkeit der Abgabestellen [6]. In hochindustrialisierten Ländern liegt die Problematik vielfach in einer Lagerung alter, oft noch funktionsfähiger Geräte in den Privathaushalten und der häufig erfolgenden Entsorgung über die Hausmülltonne [27].

3. Zusammenfassung und Ausblick

Recycling ermöglicht den umweltverträglichen Umgang mit Rohstoffen sowie erhöhte wirtschaftliche Unabhängigkeit und Versorgungssicherheit. Für einzelne Materialien bestehen bereits sehr effiziente Recyclingsysteme. Gerade Metalle können in der Theorie unbegrenzt recycelt werden, in der Praxis kommt es jedoch zu hohen Verlusten dissipativer Art, deren Vermeidung ein großes wirtschaftliches Potenzial darstellt. Besonders deutlich wird dies im Hinblick auf die Hochtechnologiemetalle.

Für das zukünftige Erstellen von Handlungsempfehlungen zwecks Vermeidung ist zunächst eine Klassifizierung dissipativer Verluste notwendig. Ein Vorschlag ist die Unterteilung in die folgenden sechs Kategorien:

Verluste aufgrund

- thermodynamischer Eigenschaften,
- nicht nachhaltiger Produktgestaltung,
- bestimmungsgemäßen Gebrauchs,
- Korrosion,
- Abrasion,
- mangelhafter Sortier- und Sammelsysteme.

Diese Verlustkategorien weisen ein unterschiedlich starkes Maß an Verbesserungspotenzial auf, um die Gesamteffizienz der Kreislaufwirtschaft zu erhöhen. Vermeidungsstrategien für Materialverluste über den Lebenszyklus von Industrieprodukten sind an vielen Punkten der Nutzungskette denkbar, die teilweise aufeinander aufbauen. Als grundlegender Schritt zur Vermeidung von Materialverlusten im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft gilt es, die Bereitschaft der Verbraucher zur Einhaltung getrennter Abfallströme zu verbessern und somit die Rücklaufquoten zu steigern. Zu diesem Zweck wäre eine Bewusstseinsbildung durch Bildungsmaßnahmen zu einer transparenten Abfallwirtschaft sinnvoll. Auch die Einführung von Pfandsystemen ist für relevante Produktkategorien denkbar und erhöht nachweislich die Rücklaufquoten [25]. Neben den erhöhten Inputraten ließe sich dadurch außerdem die Reinheit der Materialströme verbessern. In Anbetracht der Tatsache, dass der für das Recycling eines Materials nötige Aufwand größtenteils von der Separation aus einem gemischten Stoffstrom ausgeht [12], sollte ein Vermischen verschiedener Materialien bestmöglich vermieden werden. Neben dem Bewusstsein und der Bereitschaft des Recyclers spielt dabei auch die offensichtliche Materialdeklaration eine sehr wichtige Rolle. Eine verstärkte Etablierung von Stoffströmen sortenreinerer Materialien ermöglicht zielführendere Recyclingverfahren, die eine Steigerung der Effizienz zur Folge hätten. Die Metallanteile mögen dem Recycler auf den ersten Blick als nicht relevant erscheinen. In einem durchschnittlichen Smartphone befinden sich beispielsweise etwa 0,3 g Silber, 0,03 g Gold, 0,05 g Neodym und weitere Hochtechnologiemetalle [8]. Dass diese Metallgehalte jedoch um ein Vielfaches über den Gehalten der natürlich vorkommenden Erze liegen – einhundert Smartphones mit einem Gewicht von etwa elf Kilogramm enthalten die gleiche Goldmenge wie eine Tonne Golderz – ist den wenigsten Menschen bewusst. Im Falle der seltenen Erden liegen diese Verhältnisse meist sogar noch höher.

Verbesserte Recyclingverfahren, die an die Grenzen der technischen Machbarkeit stoßen, werden tendenziell mit erhöhtem ökonomischem Aufwand einhergehen, so dass ab einem gewissen Punkt die Kosten den erhaltenen Erlös übersteigen. Diese Gewinnschwelle gilt es durch geeignete Maßnahmen zu verschieben. Denkbar sind sowohl technische und logistische Optimierungen, als auch politische Anpassungen. Verschiedene Modelle wie etwa die vom Sachverständigenrat für Umweltfragen vorgeschlagene Materialinputsteuer [18] oder die Festlegung von verbindlichen Mindestanforderungen der Abfallrahmenrichtlinie sind hier zu nennen.

Eine funktionsfähige Kreislaufwirtschaft erfordert Verbesserungen auf vielfältigen Gebieten und kann demnach nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglicht werden. Zur dauerhaften Aufrechterhaltung ist letzten Endes jeder gefragt – Politiker, Produzent und Verbraucher. Es lassen sich jedoch auch unter der Annahme einer einhundertprozentigen Rücklaufquote und der Verwendung der effizientesten Recyclingverfahren nicht sämtliche beschriebenen Verlustmechanismen im Lebenszyklus der Produkte umgehen. Letztendlich verhindern die thermodynamischen Gesetze eine vollständige Rückgewinnung, verfügbare Materie wird stets in nicht mehr verfügbare Materie umgewandelt [23]. Stark limitiert verfügbare Materialien sollten daher stets einer besonders sorgfältigen Prüfung hinsichtlich möglicher Substitutionsoptionen unterzogen werden. Lässt sich die Verwendung nicht umgehen, wäre eine Erhöhung der Zyklusdauer, in denen die Materialien das System aus Nutzung und Wiederaufbereitung durchlaufen, die naheliegende Lösung zur Verlustvermeidung. Dies kann entweder durch erhöhte Produktlebensdauer und intelligenten Materialeinsatz geschehen oder aber durch kaskadierte Nutzungskonzepte, die das Durchlaufen besonders verlustbehafteter Lebenszykluspositionen reduzieren. Sortenreine Materialströme könnten etwa zunächst in weiteren Industriebereichen als Einsatzmaterialien genutzt werden, anstatt wie bisher den energie- und materialaufwendigen Schritt der Materialtrennung zu durchlaufen.

Es darf nicht vergessen werden, dass langfristig betrachtet die natürlichen Vorkommen sämtlicher Rohstoffe endlich sind und daher die Vermeidung dissipativer Verluste schon heute in bedeutender Weise zur Rohstoffversorgung der Zukunft beitragen kann. Die statistische Reichweite, welche sich aus dem Verhältnis der momentan abbaubaren Reserven eines Rohstoffs und seiner jährlichen Fördermenge errechnet, wird bisher als Indikator für die Knappheit von Ressourcen verwendet. Diese Methodik zeichnet jedoch ein verzerrtes Bild, da sowohl der Umfang der Reserven, als auch die jährliche Fördermenge durch technische und wirtschaftliche Faktoren variieren. Die Dynamik aus Angebot und Nachfrage führt dabei beispielsweise bei steigenden Preisen zur Exploration neuer Lagerstätten, was die statistische Reichweite verlängert. Gleichzeitig werden durch höhere Preise Technologieentwicklungen vorangetrieben, die Materialeinsparungen oder-substitutionen bewirken können [21]. Restriktionen der Rohstoffgewinnung durch Umweltauflagen fließen bisher nicht in die Kalkulation der Reichweiten ein. Die entstehenden sozialen und umweltbezogenen Kosten werden demnach bisher nicht berücksichtigt. In der Realität werden jedoch diese Auswirkungen tendenziell umso drastischer, je weiter man sich dem Ende der absoluten Reichweite eines Rohstoffes nähert. Daher ist die Etablierung eines neuen Reichweitenbegriffs notwendig, der soziale und ökologische Kriterien miteinbezieht. Das gesamte Ausmaß der Vorteile des Recyclings als Baustein der nachhaltigen Kreislaufwirtschaft würde somit weitaus realistischer dargestellt. Das Schließen der Stoffkreisläufe ist ein elementarer Schritt auf dem Weg zur Rohstoffwende, die zusammen mit der Energiewende das Fundament für die nachhaltige Industriegesellschaft darstellt.

4. Quellen

- [1] ALBA Group; Fraunhofer UMSICHT: Recycling für den Klimaschutz – Ergebnisse der Fraunhofer UMSICHT-Studie zur CO₂-Einsparung durch Recycling - eine Untersuchung für die ALBA Group. 2011.
- [2] Albert, E.; Eckert, H.; Roschke, M.; Kerschberger, M.; Breitschuh, G.: Agrarfakten Mineraldüngung. 2014. files.agrarfakten.de/200000095-ae954af8fd/AF_Mineraldüngung_23_081014.pdf.
- [3] Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. 2009.
- [4] Babbitt, C. W.; Kahhat, R.; Williams, E.; Babbitt, G. A.: Evolution of product lifespan and implications for environmental assessment and management: a case study of personal computers in higher education. In: *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, Nr. 13, S. 5106–5112, 2009.
- [5] Befesa – Steel and Galvanization Waste Recycling. http://www.befesa-steel.com/web/de/servicios/tecnologia/horno_rotatorio/index.html. Daten von: 04. Februar 2015
- [6] Beigl, S. S. P.; Schneider, F.: Vergleich von Sammelsystemen für Mobiltelefone. *Müll und Abfall* (10), 2010.
- [7] Bookhagen, B.; Nordmann, J.: Acceptance of Mobile Phone Return Programs: A Case Study Based Analysis. *Inf. Commun. Technol.*, Nr. 59, S. 59–64, 2013.
- [8] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D.: Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachbericht 38. 2012.
- [9] Burkhardt, M.; Rossi, L.; Boller, M.: Release of Various Substances to the Environment by Regular Railway Operation. In: 7th World Congress on Railway Research, Montreal, Canada. No. ECOL-CONF-2008-005, 2006.
- [10] Chancerel, P.: Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. In *Schriftenreihe des Instituts für Technischen Umweltschutz*, Berlin, vol. 09, 2010.
- [11] Cheung, W. M.; Marsh, R.; Grif, P. W.; Newnes, L. B.; Mileham, A. R.; Lanham, J. D.: Towards cleaner production: a roadmap for predicting product end-of-life costs at early design concept. vol. 87, S. 431–441, 2015.
- [12] Craig, P. P.: Energy limits on recycling. *Ecol. Econ.*, vol. 36, S. 373–384, 2001.
- [13] Donatello, S.; Cheeseman, C. R.: Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review. *Waste Manag.*, vol. 33, Nr. 11, S. 2328–2340, 2013.
- [14] Erdmann, L.; Hilty, L.; Althaus, H.-J.; Behrendt, S.; Hischier, R.; Kamburow, C.; Oertel, B.; Wäger, P.; Weiz, T.: Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 27/2009, 2009.
- [15] Europäische Union, Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. 1986.
- [16] European Soil Portal: Loss of organic matter. In *Soil Atlas of Europe*, European Commission Joint Research Centre, 2015, S. 112.
- [17] Fäßler, K.: Metallkorrosion. *Chemie unserer Zeit*, vol. 3, Nr. 3, S. 77–83, 1969.
- [18] Faulstich, M.; Foth, H.; Calliess, C.; Hohmeyer, O.; Holm-Müller, K.; Niekisch, M.; Schreurs, M.; Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRÜ): Umweltgutachten 2012–Verantwortung in einer begrenzten Welt. 2012.
- [19] Friedrich, B.; Zander, M.; Kemper, C.: Rückgewinnung von Kupfer und Kobalt aus Schlacken der NE-Metallurgie. In: *Abfallverbrennung und Metallurgie*, Berliner Schlackenkonferenz, 2013, S. 599–614.

- [20] Frischenschlager, H.; Karigl, B.; Lampert, C.; Pözl, W.; Schindler, I.; Tesar, M.; Wiesenberger, H.; Winter, B.: Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. 2010.
- [21] Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Vance, C.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M.: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, 2007.
- [22] Frondel, M.; Peters, J.; Vance, C.: Identifying the rebound: evidence from a German household panel. *Ruhr Econ. Pap.*, Nr. 32, 2007.
- [23] Georgescu-Roegen, N.: The Entropy Law and the Economic Process. In: *Schriftenreihe des Instituts für Ökologische Wirtschaftsforschung*, vol. 5, 1987, S. 4–31.
- [24] Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM), *Packaging Recycling Report*, Nr. 20. 2014.
- [25] Gitlitz, J.: *Bottled Up: Beverage Container Recycling Stagnates – U.S. Container Recycling Rates & Trends*, 2013. *Container Recycling Institute*, vol. 2013.
- [26] Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: *Recycling rates of metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. 2011.
- [27] Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.: *What Do We Know about metal recycling rates?.* USGS Staff, *Publ. Res.*, Nr. 596, 2011.
- [28] Heldstab, J.; Kljun, N.; INFRAS AG: *PM10-Emissionen Verkehr – Teil Schienenverkehr*. 2007.
- [29] Hicks, R. E.: *Structure of Bacterial Communities Associated with Accelerated Corrosive Loss of Port Transportation Infrastructure*. *Great Lakes Maritime Research Institute*, 2007.
- [30] Honan, M.: *Google's New Modular Phone May Be the Last You'll Need to Buy*. 2014. <http://www.wired.com/2014/04/google-project-ara/>. Daten von: 05.Februar 2015
- [31] Hulskotte, J. H. J.; Roskam, G. D.; van der Gon, H. A. C. D.: *Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors*. *Atmos. Environ.*, vol. 99, S. 436–445, 2014.
- [32] Igarashi, K.; Yamada, T.; Masato, I.: *Disassembly System Design with Environmental and Economic Parts Selection using Recyclability Evaluation Method*. *J Jpn Ind Manag. Assoc.*, vol. 64, Nr. 2, S. 293–302, 2013.
- [33] Koch, G. H.; Brongers, M. P. H.; Thompson, N. G.; Virmani, Y. P.; Payer, J. H.: *US Department of Transportation: Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States*, 2002.
- [34] Kulshrestha, A.; Massey, D. D.; Masih, J.; Taneja, A.: *Source Characterization of Trace Elements in Indoor Environments at Urban, Rural and Roadside Sites in a Semi Arid Region of India*. *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 14, S. 1738–1751, 2014.
- [35] Kümmerer, K.: *Abschied vom fossilen Kapitalismus*. *Tutzinger Blätter – Deutschlands Rolle in der Welt*, A. 12–14, 2012.
- [36] Meyer, B.; Meyer, M.: *The Policy Implications of Economy-Wide Rebound Effects: Insights from a Macroeconomic Model Simulation of Concurrent Climate Policy and Resource Efficiency Actions for Germany*. *Conference Paper, EAERE 2011, Rome*, 2011.
- [37] *Mobile Phone Partnership Initiative (MPPI): Project 2.1 - Guideline on the Collection of Used Mobile Phones*. 2009.
- [38] Mocker, M.; Faulstich, M.: *Langzeitstudie an der Bundesstraße B16 in Bayern*. In: Heußén, M.; Motz, H. (Hrsg.): *Schlacken aus der Metallurgie Band 3 – Chancen für Wirtschaft und Umwelt*, Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 365–375.
- [39] Paiano, A.; Lagioia, G.; Cataldo, A.: *A critical analysis of the sustainability of mobile phone use*. *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 73, S. 162–171, 2013.
- [40] Perry, N.; Bernard, A.; Laroche, F.; Pompidou, S.: *Improving design for recycling – Application to composites*. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, Nr. 1, S. 151–154, 2012.

- [41] Schlacke, P. D. S.; Stadermann, M.; Grunow, M.: Rechtliche Instrumente zur Förderung des nachhaltigen Konsums – am Beispiel von Produkten. Umweltbundesamt, Berlin: S. 123, 2012.
- [42] Sorrell, S.: Energy, economic growth and environmental sustainability: Five propositions. *Sustainability*, Nr. 2, S. 1784–1809, 2010.
- [43] Thorpe A.; Harrison, R. M.: Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Sci. Total Environ.*, vol. 400, Nr. 1–3, S. 270–282, 2008.
- [44] Umeda, Y.; Fukushige, S.; Mizuno, T.; Matsuyama, Y.: Generating design alternatives for increasing recyclability of products. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, Nr. 1, S. 135–138, 2013.
- [45] Von Billerbeck, E.; Ruh, A. Kim, D.: Verarbeitung von Filterstäuben aus der Elektrostahlerzeugung im Wälzprozess. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Neuruppin: TK Verlag Karl J. Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 387–398.
- [46] Von Gleich, A.; Brahmer-Lohss, M.; Gottschick, M.; Jepsen, D.; Lohse, J.; Sander, K.: *Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg, Erkenntnisse – Erfahrungen – praktische Erfolge*. 2001.
- [47] Veit, H. M.; Pereira, C. C.; Bernardes, A. M.: Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. *Jom*, vol. 54, S. 45–47, 2002.
- [48] Wilts, H.; Lucas, R.; Von Gries, N.; Zirngiebl, M.: *Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze*. 2014.
- [49] *Wirtschaftsvereinigung Metalle: Metallstatistik 2013*. 2013.
- [50] Zeller, T.; Bachmann, A.; Sauter, A.: Tailings of Mining and Processing as Alternative Raw Material Repository. In: *Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz, Leoben, 2014*, S. 559–564.
- [51] Zeller, T.; Sauter, A.: Innovative Konditionierungstechniken für Sekundärrohstoffe am Beispiel von Hüttenreststoffen und Post-Production-Abfällen der Automobilindustrie. In: *Workshop Recycling von Wertstoffen, materials valley, 2013*.
- [52] Zeller, T.; Schulze, S.; Sauter, A.; Gock, E.; Schönfelder, I.; Lavric, T.: Entzinkung von Stahlschrotten. In: *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen – Ergebnisse der Fördermaßnahme r₂*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013, S. 82–97.
- [53] Zeller, T.; Stein, T.: Innovative Forschungsansätze zur Sekundärmetallgewinnung – CUTEC-Ansätze. In: *EUROFORUM, 2014*.
- [54] Zussman, E.; Kriwet, A.; Seliger, G.: Disassembly-Oriented Assessment Methodology to Support Design for Recycling. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 43, Nr. 2, S. 9–14, 1994.

One Seven®

Löschsysteme für

Abfallwirtschaft/Recyclingindustrie



Schaumausbringung
aus Rotor



Schaumausbringung
aus Wandhydrant



Fließfähigkeit
homogener Schaum



Containervariante für Unter-
bringung der Löschanlage

Automatische Brandbekämpfungsanlage mit Druckluftschaum ist in der Abfallwirtschaft/Recyclingindustrie besonders gut geeignet.

Warum?

- Kontrollieren/Löschen von kritischen Brandlasten
Größtes Risiko sind Lagerungen von Kunststoffen
- große Wurfweiten
- hohe Verweildauer auf dem Brandgut
auch bei steilen Hanglagen
- verhindert Rückzündung
durch starke Durchfeuchtungsfähigkeit
- geringe Wasservorberatung
- geringe Zumischrate des Schaummittels
→ umweltfreundlich
- schnelle und hohe Löschwirksamkeit durch:
Trenn- und Kühleffekt

Besonderheiten

- manuelle und/oder automatische Auslösung
der Löschanlage
- Anwendung in großen, ausgedehnten sowie hohen Räumen
- Schaumausbringung über Rotore, Monitore
und/oder Wandhydranten

Die stationären One Seven® Druckluftschaum-Löschanlagen haben sich bereits in zahlreichen Betrieben erfolgreich bewährt.

Ausgewählte Referenzen:

- Abfallentsorgung in Neunburg vorm Wald
- Papierrecycling in Knetzgau
- Thermische Restabfallbehandlungsanlage in Bitterfeld
- Recyclingunternehmen in Dissenchen (östlich von Cottbus)
- u.v.a.

One Seven hilft bei einer maßgeschneiderten Lösung.

One Seven of Germany GmbH
a One Seven International Company
Rudolf-Breitscheid-Str. 78
14943 Luckenwalde, Germany
Phone: +49 (0) 3371-6913-0
Email: info@oneseven.com
Web: www.oneseven.com



one seven®

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 8

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,
Max Müller, Cordula Müller
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.