SIMON FILSER, JULIANE HAFERMANN, TOBIAS HELBIG,
PAUL KLAR, CHRISTIAN OBERMEIER, NIKO TEKLES

ABSCHLUSSBERICHT

EIN PROJEKT DER TUM: JUNGE AKADEMIE

Danksagung

„…dann nur deshalb, weil ich auf den Schultern von Giganten stand.“[1]

Unserem Mentor, Herrn Prof. Dr. em. Helmut Greim, der Tutorin Frau Dipl. Ing. Daniela Krings, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rommel vom bifa Umweltinstitut, Herrn Christian Dworak von der Bosch-Siemens Hausgeräte GmbH und Herrn Dr. Ulrich Lottner vom Bayerischen Landesamt für Umwelt gilt unser Dank dafür, dass sie alle uns geduldig auf ihren Schultern Platz nehmen ließen.

[1] Sir Isaac Newton an Robert Hooke, 5. Februar 1676

Müll als Ressource: Ein Studienprojekt an der *TUM: JUNGE AKADEMIE* im Studienjahr 2010/2011

PROJEKTHOMEPAGE: https://www.muell-als-ressource.jungeakademie.tum.de/

PROJEKTSPRECHER: Simon Filser (filser@mytum.de)

Inhalt

1. Die Autoren 4
2. Einleitung 5
3. Trennsysteme für Hausmüll 7
4. Recycling von Produktverpackungen am Beispiel PET 9
4.1 Der Stoff PET 9
4.2 Woran erkennt man PET? 9
4.3 Vergleich von PET mit traditionellen Verpackungsmaterialien 10
4.4 Eventuelle gesundheitliche Bedenken 10
4.5 Herstellung von PET 12
4.6 Recycling von PET 13
4.7 Diskussion 18
5. Elektronikgeräte im Stoffkreislauf 20
5.1 Entwicklung der Schrottmenge 20
5.2 Zusammensetzung eines Mobiltelefons 20
5.3 Recycling von Elektronikschrott 22
5.4 Probleme beim Elektronikschrottrecycling 24
6. Kennzeichnung mittels RFID Transpondern 28
6.1 Vorteile des Konzeptes 28
6.2 Technische Details 30
6.3 Erweitertes Sammel- und Verwertungskonzept 31
6.4 Die Konsequenz: Bessere Recyclingfähigkeit der Produkte 34
6.5 Schwachpunkte des Konzeptes 34
7. Zertifizierung von Elektronikgeräten 36
8. Diskussion und Ausblick 41
9. Literaturverzeichnis 42

1. Die Autoren

Simon Filser, geboren am 05.04.1988, absolvierte die Hochschulreife im Jahr 2007 am Veit-Höser-Gymnasium Bogen. Nach dem Zivildienst nahm er das Studium der Physik an der Technischen Universität München auf. Nach Abschluss des Bachelor of Science in Physik (2011) strebt er ein Masterstudium in Applied and Engineering Physics, ebenfalls an der TU München, an (voraussichtlicher Abschluss 2013).

Juliane Hafermann, geboren am 20.11.1987, absolvierte die Hochschulreife im Jahr 2008 am Gabriel-von-Seidl Gymnasium Bad Tölz. Im Anschluss folgte die Aufnahme des Studiums der molekularen Biotechnologie an der TU München, wobei nach Abschluss des Bachelor of Science ein Masterstudium im gleichen Fach angestrebt wird.

Tobias Helbig, geboren am 21.05.1987, absolvierte die Hochschulreife im Jahr 2006 am Landschulheim Wiesentheid. Nach abgeleistetem Grundwehrdienst nahm er das Studium des Maschinenwesens an der TU München auf. Der angestrebte Abschluss ist hierbei der Titel des Diplom-Ingenieurs mit der Vertiefungsrichtung Mechatronik im Jahr 2012.

Paul Klar, geboren am 18.02.1988, erwarb die Hochschulreife im Jahr 2007 am Carf-Orff-Gymnasium Unterschleißheim. Nach dem Grundwehrdienst im Sanitätsdienst folgte das Studium der Geowissenschaften mit der Vertiefungsrichtung Mineralogie. Nach dem Bachelorabschluss folgt das Masterprogramm Advanced Materials Science (Abschluss 2013).

Christian Obermeier, geboren am 17.05.1974 in Rosenheim erwarb sein Abitur berufsbegleitend während seiner Tätigkeit als Geschäftsführer im elterlichen Handwerkerbetrieb. Dieser Tätigkeit folgte ein Studium zum BSc. Forstwissenschaft an der TU München (Abschluss 2011) und zum BSc. Mathematik an der Fernuniversität in Hagen (Abschluss 2012). Darauf aufbauend verfolgt der Autor ein Studium zum MSc. Umweltplanung und Ingenieurökologie und zum MSc. Mathematik an den genannten Hochschulen.

Nikolas Tekles, geboren am 03.12.1988 in Fürstenfeldbruck, erwarb seine Hochschulreife 2008 am Gymnasium Gars a. Inn und begann im selben Jahr das Maschinenbaustudium an der TU München. Nach Abschluss des Bachelorstudiums ist das konsekutive Masterstudium ebenfalls an der TU München geplant.

2. Einleitung

Christian Obermeier

Der Umgang mit Rohstoffen nimmt in der industrialisierten Welt des beginnenden 21. Jahrhunderts eine zentrale Stellung ein. Gilt dies für die nachhaltige Bewirtschaftung erneuerbarer Ressourcen, wie beispielsweise Holz oder Kautschuk, so muss dies erst recht für endliche Rohstoffe gelten. Neben der Exploration und Exploitation natürlicher Lagerstätten wird jedoch oft übersehen, dass ein geraumer Anteil von mehr oder weniger wirtschaftsfähigen Materialien sich bereits im Stoffkreislauf befindet. Diese Arbeit beschäftigt sich davon ausgehend mit der Nutzung und Nutzbarmachung so genannter Sekundärrohstoffe.

Zur Verdeutlichung sei dies am Beispiel des Metalls Kupfer erläutert: Weltweit rechnet man mit natürlichen, abbaufähigen Vorkommen von derzeit rund 480 Mio. t. In anthropogenen Lagerstätten (Bauwerke, Kabel und Leitungen, etc.) befinden sich zwischen 230 und 460 Mio. t Kupfer. Kupfererze werden bis zu einem Kupfergehalt von 0,5% als abbauwürdig betrachtet; Elektronikmüll hat einen durchschnittlichen Kupfergehalt von 2%.[2]

Dieses Beispiel zeigt, dass der ursprünglich vor allem ökologisch orientierten Recycling-Bewegung der 1980er Jahre ein ernsthafter ökonomischer Hintergrund erwachsen ist. Dennoch ist man im Moment noch weit von einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft entfernt. Nicht zuletzt zeigt sich dies auch der herrschenden negativen Konnotation der Worte „Müll“, „Abfall und „Schrott“.

Erschwerend kommt hinzu, dass neben der Präferenzkette „Vermeidung vor Verwertung vor Entsorgung“ auch die Abstufung der im Produkt enthaltenen Wertstoffe nach einer Verwertung „werkstofflich vor rohstofflich vor energetisch“ zu treffen ist. Wo aber sind die Grenzen zwischen den Methoden erreicht? So kann eine thermische Verwertung als Mineralölsubstitut im Zementwerk durchaus mehr Wert (auch in einer ökologischen-ökonomischen Gesamtrechnung) erzeugen, als eine aufwendige Demontage und werkstoffliche Wiederverwendung.[3]

Erst öffentlicher Diskurs und politische Steuerung führten zur Einführung von Wertstoffhöfen, getrennten Abfalltonnen und dergleichen mehr. Die kommunale Verantwortung der Sammlung

---

[2] Alle Daten aus: H FRIEGE: Zukünftige Abfallwirtschaft zwischen Siedlungshygiene und Gewinnung von Sekundärrohstoffen; in: A URBAN, G HALM (Hrsg.): *Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik der Universität Kassel*; Band 9; S.14f; Kassel University Press, Kassel 2009

[3] K BRAND, A GÖSCHL, B HARTLEITNER, S KREIBE, C PÜRSCHEL, W VIEHÖVER: *Nachhaltigkeit und abfallpolitische Steuerung*; S.25; Analytica, Berlin 2002

führte zu einer großen Vielfalt verschiedener angebotener Systeme. Einen Abriss soll das folgende dritte Kapitel bieten.

Dass es mittlerweile jedoch eine einem „policy push“ folgende Technikgenese auf dem Gebiet der Müllverwertung gibt, wird im vierten Kapitel am Beispiel des Kunststoffes PET gezeigt. Gefolgt wird dieses Kapitel durch einen Abschnitt, welcher sich eingehend mit dem Thema „Elektroschrott“ befasst. Hierin sollen neben einer bloßen Darstellung der Problematik auch zwei innovative Ansätze präsentiert werden: Eine Kennzeichnung von Elektrogeräten mittels RFID-Transpondern und die Ansprache der Konsumenten via einer Zertifizierung durch ein Produktsiegel.

3. Trennsysteme für Hausmüll

Simon Filser

In Deutschland gibt es eine Vielzahl verschiedener Entsorgungssysteme, die sich von Landkreis zu Landkreis deutlich unterscheiden. Diese Vielfalt kann effizient sein, weil die Bevölkerung in ländlichen Gebieten generell besser trennt als in Großstädten, allerdings existieren gegenwärtig mehr als nur 2 Systeme für „Stadt“ und „Land“.

Neben den etablierten Konzepten „gelber Sack“ und „Wertstoffhof“ (auf Wertstoffhöfen gibt es auch regional sehr unterschiedliche Trennregeln) werden in einigen Gemeinden neue Systeme getestet wie das System "Nass-Trocken-Tonne", in dem nur zwischen feuchten, klebrigen und trockenen, leicht maschinell zu trennenden Fraktionen unterschieden wird. Bei der "Gelb-in-Grau"-Tonne wird nur maschinell getrennt und die Bürger haben eine Tonne für den Gesamtmüll. Sehr vielversprechend ist die gelbe Wertstofftonne ("Gelbe Tonne plus").[4]

Sie soll im Vergleich zu bisherigen Systemen die Regeln für die Verbraucher vereinfachen, da nicht mehr zwischen Kunststoffverpackungen und Kunststoffgegenständen, die keine Verpackung sind (und deshalb nicht in den normalen gelben Sack gehören) unterschieden wird. Zusätzlich dürfen Metallgegenstände und Elektrokleingeräte in ihr entsorgt werden, was den Schadstoffgehalt im Restmüll reduzieren soll. Damit wird die Verwertungsquote von Wertstoffen, die im Elektroschrott sehr konzentriert sind, erhöht. Im Vergleich zu Systemen, wo Wertstoffe und Restmüll gemeinsam gesammelt werden, ist zusätzlich die Qualität besser, da sie nicht mehr mit dem generell schmutzigen Restmüll vermischt werden. So soll das System unter dem Strich für die Kommunen finanzielle Vorteile bringen.

Wegen finanziellen Fragen gibt es in der Umsetzung noch einige Probleme, wie das Beispiel Berlin zeigt. Dort gab es einen längeren Streit zwischen dem privaten Entsorger Alba und dem kommunalen Unternehmen BSR zu der Frage, wer die gewinnbringende Sammlung durchführen dürfe.[5] Das Hauptproblem besteht darin, dass Elektro- und Elektronikschrott die einzige Müllfraktion darstellen, an der die Kommunen tatsächlich etwas verdienen. Wird diese nicht mehr an kommunalen Wertstoffhöfen abgeliefert, müssten vielerorts die Abfallgebühren erhöht werden, was unpopulär ist. Auch die Finanzierung der Sammlung und Entsorgung muss noch endgültig geklärt werden.

---

[4] http://www.gelbe-tonne-plus.de/index.php, aufgerufen am 11.9.2011

[5] http://www.morgenpost.de/berlin/article1433494/Alba-erringt-Teilsieg-im-Berliner-Muellkrieg.html, aufgerufen am 11.9.2011

Wegen des positiven Gesamteindrucks ist die gelbe Wertstofftonne nach Ansicht der Projektgruppe „Müll als Ressource“ und auch vieler Politiker das vielversprechendste System für die Zukunft und könnte in einigen Jahren flächendeckend eingeführt werden.

Stellvertretend für die große Vielfalt an Stoffen, die in der „Gelben Tonne plus“ entsorgt werden dürfen, werden in den folgenden Kapiteln zwei Produkte und deren Verwertung näher beleuchtet: Eine PET-Flasche als Beispiel für eine Verpackung und ein Mobiltelefon als Vertreter der Elektronikgeräte.

4. Recycling von Produktverpackungen am Beispiel PET

Juliane Hafermann

4.1 Der Stoff PET

PET ist ein allgegenwärtiger Kunststoff, der sowohl für Fasern wie Teppiche, Kleidungsstücke oder Zeltstoffe und Gurte als auch als Verpackungsmaterial – überwiegend in Form von Flaschen und Folien – eingesetzt wird. Um PET sinnvoll und erfolgreich recyceln zu können, dürfen nicht zu viele Verunreinigungen im Ausgangsmaterial enthalten sein. Um das zu gewährleisten ist es wichtig, PET von anderen Kunststoffen durch eindeutige Kennzeichnung zuverlässig unterscheiden zu können.

4.2 Woran erkennt man PET?

Hierfür gibt es ein Identifikationssystem entsprechend einer DIN-Norm. Das in Deutschland verwendete Symbol sind drei im Dreieck angeordnete Pfeile, die jeweils auf ihren Nachfolger zeigen und so einen geschlossenen Rahmen um die Zahlen „01“ bilden. Unterhalb des Symbols befindet sich noch die Beschriftung „PET“. Dasselbe Symbol wird auch für andere Kunststoffe verwendet, hierbei stehen unterschiedliche, jeweils zweistellige Zahlen innerhalb des Dreiecks und die Abkürzung des jeweiligen Kunststoffs darunter.

Abbildung 1 PET-Symbol

Laut einer Vorschrift des europäischen Parlaments sollen alle wiederverwendbaren oder recycelbaren Verpackungsmaterialien als solche gekennzeichnet werden. Die Kennzeichnung soll die Identifikationsnummer und die Abkürzung des Kunststoffs enthalten. Da das genannte Identifikationssystem jedoch freiwillig ist, existieren auch abweichende Symbolsysteme.

Die Wichtigkeit der Kennzeichnung zur Unterscheidung der Kunststoffe ergibt sich aus der strikten Trennung, die für das Recycling nötig ist. Eine einzige Flasche aus PVC kann die Qualität von 300 kg PET bei dem mechanischen Recyclingverfahren herabsetzen. Lediglich ein Anteil von 0,25% PVC ist beim mechanischen Recycling tolerierbar. Bei anderen Methoden wie zum Beispiel dem chemischen Recycling sind bis zu 30% Verunreinigungen tolerierbar.

In Deutschland werden die PET-Flaschen dank des Pfandsystems zum größten Teil an Rückgabestellen eingesammelt. Dort werden die Flaschen entweder manuell oder durch einen Rücknahmeautomaten sortiert. Die Sortierung der Flaschen, welche von Wertstoffhöfen oder der Müllabfuhr stammen, kann in lokalen Sortierzentren automatisch mit Hilfe von

Röntgenstrahlung oder Infrarot-Scannern erfolgen. Dabei können nicht nur die Materialien, sondern auch die Farben der zu recycelnden Flaschen unterschieden werden.

4.3 Vergleich von PET mit traditionellen Verpackungsmaterialien

PET-Verpackungen haben gegenüber traditionelleren Verpackungsmaterialien zahlreiche Vorteile. Zum einen sind der Energieverbrauch und die klimarelevanten Emissionen bei deren Herstellung geringer als zum Beispiel bei Glas oder Metallen. Laut einer umfangreichen Studie der Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH werden bei der Verwendung von PET anstelle von Glas 52% Energie und 55% Gasemission eingespart. Aber nicht nur bei der Produktion kann der Energieaufwand und die Kohlendioxid-Emission reduziert werden. Durch das geringe Gewicht der PET-Verpackungen werden auch beim Transport große Einsparungen möglich. Des Weiteren sind Kunststoffflaschen bruchsicher.

Im Gegensatz zu Glasflaschen sind PET-Flaschen jedoch geringfügig durchlässig für Gase. Vor allem bei kohlensäurehaltigen Getränken kann dieses aus der Flasche diffundieren. Außerdem kann auch Sauerstoff in die Flasche gelangen, was zu schnellerer Oxidation und gegebenenfalls zu einer Geschmacksveränderung des Inhalts führen kann.

4.4 Eventuelle gesundheitliche Bedenken

Während der Herstellung und Lagerung von PET-Flaschen bildet sich Acetaldehyd im Kunststoff. Dieses kann in die darin abgefüllten Getränke diffundieren. Die gesetzlich festgelegten Grenzwerte für die Diffusion von Acetaldehyd liegen bei 6 mg pro 1 kg Lebensmittel. Obwohl bei diesem Grenzwert keine Gefährdung der Gesundheit vorliegt, kann bereits ein Hundertstel der zugelassenen Höchstmenge an Acetaldehyd als Geruch und Geschmack wahrgenommen werden. Dies trifft vor allem auf Mineralwasser zu, das in PET-Flaschen abgefüllt ist. Getränke wie zum Beispiel Coca Cola oder Fruchtsäfte, die bereits einen starken Eigengeschmack haben, sind nicht so sehr davon betroffen.

Obwohl keine gesundheitlichen Bedenken wegen des Acetaldehyds bestehen, ist die geschmackliche und olfaktorische Veränderung des Produkts unerwünscht und entspricht nicht den Qualitätsansprüchen. Um also den Übergang von Acetaldehyd aus dem Kunststoff in das Getränk zu verhindern, können unschädliche Substanzen zugesetzt werden, die Acetaldehyd binden. Alternativ kann die Innenseite der PET-Flasche mit einer glasartigen Schicht überzogen werden. Dies wirkt sich auch positiv auf die Gasdichtigkeit der Flaschen aus.

2006 wurde eine Studie des Instituts für Umwelt-Geochemie der Universität Heidelberg veröffentlicht, die Antimon in Flüssigkeiten aus PET-Flaschen nachwies. Antimon-(III)-Oxid

wird in der Herstellung von PET als Katalysator verwendet. Rückstände davon verbleiben in den PET-Flaschen, die Antimon-Konzentrationen liegen dabei deutlich oberhalb der natürlichen Hintergrundwerte. Auch in Glasflaschen wurde Antimon gefunden, jedoch in geringerer Konzentration.

Die Auswirkungen von Antimon auf Lebewesen sind laut den an dieser Studie beteiligten Wissenschaftlern noch nicht ausreichend untersucht, sodass von dieser Seite zur Vorsicht geraten wird. Das Bundesamt für Risikobewertung (BfR) weist jedoch darauf hin, dass die gemessenen Werte nur etwa einem Hundertstel des Migrationsgrenzwerts für Antimon entsprechen, der von der Europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde festgelegt wurde. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass keine gesundheitliche Beeinträchtigung durch die Antimonmigration aus den PET-Flaschen in darin abgefüllte Flüssigkeiten hervorgerufen wird.

PET-Flaschen enthalten keine Weichmacher wie Terephthalate (trotz des Namens) oder Bisphenol A, die als Xenohormone wirken könnten und östrogenartige Wirkung haben. Trotzdem wurden nicht näher spezifizierte Substanzen mit hormonähnlicher Wirkung im Wasser aus PET-Flaschen gefunden. Ein Vergleich von Glas- und PET-Flaschen lieferte jedoch keinen zwingenden Beweis, dass das PET die Quelle für diese hormonartigen Substanzen ist. Möglicherweise könnten die gefundenen östrogenartigen Substanzen auch von den Verschlusskappen der Flaschen herrühren, was aber ebenfalls unwahrscheinlich scheint, da für Glas- und PET-Flaschen - gefüllt mit dem Wasser der gleichen Quelle, aber verschlossen mit unterschiedlichen Kappen - die gleiche östrogenähnliche Aktivität aufwiesen. Eine Kontamination des Wassers während der Produktion und des Abfüllens kann ebenfalls momentan nicht ausgeschlossen werden. Insgesamt beurteilt das BfR die östrogenartigen Substanzen in Mineralwasser als bedenklich. Es bedarf für eine genauere Beurteilung jedoch zusätzlicher Untersuchungen und der Identifikation der wirksamen Substanzen sowie eine genaue Messung der Konzentrationen. Das BfR beruhigt jedoch und gibt bekannt, dass der jetzige Wissensstand keinen Anlass bietet, dass Verbraucher von PET- auf Glasflaschen wechseln müssten.

Beim mechanischen Recycling werden solche Nebenprodukte der PET-Herstellung wie Antimon oder Acetaldehyd abgereichert, sie haben jedoch bei keiner Art des Recyclings störende Effekte.

4.5 Herstellung von PET

PET ist die geläufige Abkürzung für Polyethylenterephthalat, einen polymeren Kunststoff, der aus den Monomeren Ethylenglycol und Terephthalsäure hergestellt wird. Die Monomere werden über eine Esterbindung zwischen jeweils einer Carboxylgruppe (=Säuregruppe, COOH) der Terephthalsäure und einer Hydroxylgruppe (=alkoholische Gruppe, OH) des Ethylenglycols verknüpft. Da beide Moleküle jeweils zwei der genannten funktionellen Gruppen aufweisen, bildet sich ein Polymer, in dem abwechselnd je ein Molekül Terephthalsäure und Ethylenglycol wie an einer Kette nacheinander aufgereiht werden.

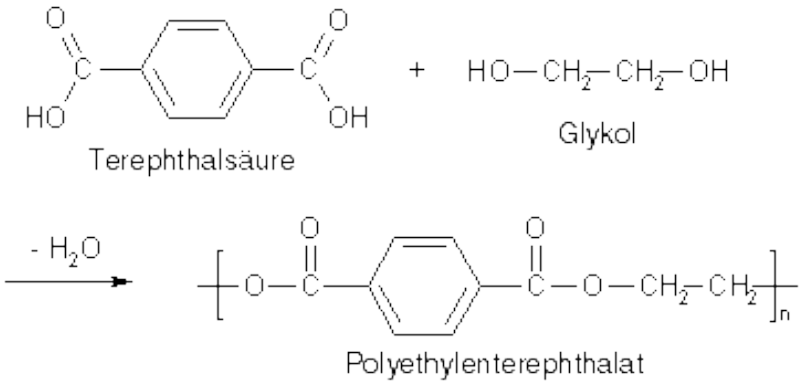

Abbildung 2 Strukturformeln der für Herstellung von PET aus Terephthalsäure und Ethylenglycol.

Um allerdings eine ausreichende Länge der kettenartigen Moleküle zu gewährleisten, ist eine sehr große Reinheit der Ausgangsstoffe für die PET-Synthese vorausgesetzt.

Generell werden zwei Verfahren zur Synthese von PET unterschieden. Zum einen wird das Umesterungsverfahren eingesetzt, bei dem das mit der Terephthalsäure veresterte Methanol durch Ethylenglycol ersetzt wird. Obwohl diese Methode gegenüber der Direktveresterung benachteiligt ist, wurde sie früher als übliche Herstellungsart von PET verwendet. Bei der Direktveresterung ist schneller, kostengünstiger und liefert ohne Katalysator, der bei der Umesterung nötig ist, vergleichbare Produkte, allerdings ist bei diesem Verfahren eine höhere Temperatur, ein höherer Druck oder beides nötig.

Die Polykondensation, bei der kürzere PET-Ketten zu längeren zusammengefügt werden, ist sowohl bei der Direktveresterung als auch bei der Umesterung unumgänglich, um PET-Ketten der gewünschten und benötigten Länge zu erhalten. Sie ist nur möglich unter Zusatz eines Katalysators. Bei 90% des weltweit hergestellten PET wird das giftige Antimon-(III)-Oxid (Sb_2O_3) als Katalysator verwendet.

Ob die Monomere für die Synthese von PET aus Erdöl gewonnen wurden oder aus Depolymerisierung von PET rückgewonnen wurden, spielt hierbei keine Rolle, solange sie in ausreichender Reinheit vorliegen.

4.6 Recycling von PET

Es gibt unterschiedliche Methoden, wie PET recycelt werden kann. Es gibt das mechanische Recycling oder Umschmelzen des Kunststoffs, chemische Methoden zur Depolymerisierung (also zum Spalten der langen Moleküle) oder Verbrennung der PET-Kunststoffe zur Energiegewinnung.

Verunreinigungen im Ausgangsmaterial

Welche Recyclingmethode angewandt wird, hängt neben ökonomischen Betrachtungen und der Komplexität des Prozesses vor allem von dem Kontaminationsgrad des Materials ab.

Makroskopische physikalische Verunreinigungen wie zum Beispiel Papierstücke, Schraubverschlüsse, die oft aus anderen Kunststoffen wie zum Beispiel PVC bestehen, oder Schmutz lassen sich meist relativ leicht durch Aussortieren und Waschen entfernen. Mikroskopische physikalische Verunreinigungen wie zum Beispiel Rückstände von Klebstoffen oder kleine Schmutzpartikel, die in das Plastik zum Beispiel aufgrund von Abschürfungen eindringen konnten, sind oft schwerer zu beseitigen. Solche Verunreinigungen können jedoch bei der Wiederverwertung des PET zu einem Verlust der Qualität des entstehenden recycelten Materials führen.

Die Aufnahme von Geschmacksstoffen, Ölen oder Ähnlichem aus dem Inhalt des PET-Behälters in den Kunststoff ist verantwortlich für eine chemische Kontamination des PET. Dabei können die Verunreinigungen von ursprünglich darin abgefüllten Inhalten stammen. Andererseits werden leere PET-Gefäße aber auch oft für andere Zwecke als dem Ursprünglichen verwendet, was Verunreinigungen, zum Beispiel mit Putzmitteln, Insektenvernichtungsmitteln oder Düngemitteln, zur Folge haben kann. Eine Entfernung der chemischen Kontaminationen ist sehr arbeits- und zeitaufwändig und wird deshalb nur durchgeführt, wo es nötig ist. Wird das recycelte PET zum Beispiel nicht für die Verpackung von Lebensmitteln sondern für Füllmaterial oder Fasern verwendet, ist eine solche Kontamination meist zu vernachlässigen und wird deshalb nicht entfernt.

Mechanisches Recycling

Beim mechanischen Recycling wird das PET lediglich gewaschen und zu Flakes zerkleinert. Anschließend werden die Flakes geschmolzen und entweder ohne Zusätze oder unter Zugabe von neu synthetisiertem („virgin“) Polymer weiterverarbeitet. Da bei diesem Verfahren die Qualität des entstehenden Produkts bestimmt wird durch die unterschiedlichen - oft relativ geringen - Qualitäten der eingesetzten Materialien, wird es auch Downcycling genannt.

Dabei ist vor allem eine vollständige Sortierung wichtig. Eine Kontamination mit PVC, zum Beispiel, würde zu einer Spaltung der PET-Polymere führen und kann sogar die eingesetzten Maschinen zerstören.

Da das PET beim mechanischen Recycling nicht neu hergestellt wird, verringert sich hierbei auch die Belastung mit Acetaldehyd und Antimon. Beim chemischen Recycling hingegen entsteht das PET neu aus den Monomeren, sodass die Kontamination im Vergleich zu „neuem“ PET nicht abweicht.

Abbildung 3 Transparente PET-Flakes

Chemisches Recycling

Beim chemischen Recycling wird das Polymer wieder in chemische Ausgangsstoffe für eine erneute Herstellung von Kunststoff zerlegt. Je nachdem, welches Verfahren hierbei verwendet wird, entstehen unterschiedliche Monomere. Ziel ist dabei jedoch stets eine umgekehrt verlaufende Reaktion, sozusagen eine umgekehrte Esterbildung. Diese Verfahren werden meist mittels Solvolyse durchgeführt, also eine Spaltung der Esterbindungen unter Einbezug eines Lösungsmittels wie zum Beispiel Wasser, Methanol oder Glycol.

Die Flexibilität des chemischen Recycling gegenüber dem mechanischen Recycling ist wesentlich größer, was die Zusammensetzung des Materials und die Toleranz gegenüber Verunreinigungen betrifft. Andererseits ist die chemische Methode auch wesentlich kapitalintensiver und erweist sich erst bei großen Umsätzen als wirtschaftlich. Um eine Anlage zur PET-Depolymerisierung rentabel betreiben zu können, ist ein Mindestumsatz von 15.000 Tonnen pro Jahr nötig. Dabei gilt, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlage umso größer ist, je mehr PET umgesetzt wird.

Die unterschiedlichen Prozesse haben unterschiedliche Ansprüche an die Qualität des Ausgangsmaterials. Gefärbte PET-Flaschen können zum Beispiel durch Hydrolyse, Verseifung und Methanolyse zumindest teilweise von den Farbstoffen befreit werden. Die Glycolyse hingegen kann Farbstoffe, die dem PET während der ursprünglichen Herstellung hinzugefügt wurden, nicht entfernen. Hierfür sind zusätzliche Reinigungsschritte vonnöten.

Um chemisches Recycling wettbewerbsfähig gegenüber dem mechanischen Recycling zu machen, müssen entweder die Prozesskosten oder die Preise für das Material geringer sein. Da die chemischen Recyclingmethoden größtenteils unempfindlicher gegenüber Verunreinigungen des Materials sind als mechanische Verfahren, können auch qualitativ weniger hochwertige und damit kostengünstigere Ausgangsmaterialien verwendet werden. Dazu zählen zum Beispiel

gefärbtes PET oder durch Fremdkunststoffe, Klebstoffe oder Papierreste verunreinigte PET-Flaschen.

Es gibt zahlreiche unterschiedliche chemische Recyclingmethoden, die hier nur kurz erklärt werden sollen. Die Methanolyse liefert bei hohen Temperaturen, einen hohen Druck und unter Verwendung eines Katalysators die Ausgangsstoffe für die PET-Herstellung nach dem Umesterungsverfahren. Da heutzutage allerdings die Direktveresterung die bevorzugte PET-Synthesemethode ist, wird dieses Recyclingverfahren nicht mehr so oft eingesetzt.

Bei der Glycolyse, der am häufigsten eingesetzten Methode zum Recycling von PET, wird das Polymer mit einem Glycol-Überschuss gespalten, wobei nicht die ursprünglichen Monomere sondern kurze Oligomere entstehen. Allerdings besteht hier das Problem, dass die Qualität des PET beim Recycling vermindert wird. Dafür ist das Verfahren im Vergleich zur Methanolyse kostengünstiger.

Bei der Hydrolyse wird PET mit Hilfe von Wasser gespalten. Hierfür sind aber extreme Bedingungen und/oder ein Katalysator nötig. Großtechnisch wird dieses Verfahren deshalb eher selten betrieben. Zudem ist die Hydrolysereaktion ein Problem bei der Herstellung von PET-Polymeren. Ist Wasser in dem Reaktionsansatz vorhanden, so werden bei der Synthese der Polymere diese gleich wieder durch die Hydrolyse gespalten. Aus diesem Grund muss dem Ansatz zur Synthese alles Wasser entzogen werden, um eine unerwünschte Spaltung des soeben hergestellten Polymers zu verhindern.

Bei der Verseifung erfolgt eine Umsetzung von PET mit einer alkalischen Lösung. Zu den Verseifungsmethoden zählen auch die gewerblich eingesetzten Verfahren „Recopet“ (Frankreich) und „Unpet“ (USA). Die Verseifung ist im Vergleich zu den anderen Prozessen einfach und billig durchzuführen. Allerdings werden auch zusätzliche Prozessschritte nötig, weil bei diesem Verfahren Salze entstehen, die erst durch Säurebehandlung wieder aufgelöst werden müssen.

Herstellung anderer Kunststoffe aus PET

Die Herstellung von Polyester-Polyolen aus PET ist eine weitere Methode zum Recycling. Dabei wird das PET nicht wieder zu PET recycelt, sondern zu anderen Polyestern wie zum Beispiel aromatischen Polyester-Polyolen. Diese werden Polyisocyanurat-Schaum (PIR-Schaum) beigesetzt, der zur Isolation von Gefäßen, Kühlschränken oder Gebäuden dient. Da dieser Herstellungsprozess recht wenig anfällig gegenüber Kontaminationen ist, kann auch ein Ausgangsmaterial geringerer Qualität dafür verwendet werden, das sich nicht eignen würde, mit einem der oben genannten anderen Verfahren wieder zu PET recycelt zu werden.

Die Polyester-Polyolproduktion bietet außerdem einen Markt für die Verwendung von gefärbten PET-Flaschen, da der Herstellungsprozess so unempfindlich gegenüber Kontaminationen ist und das Produkt zahlreiche Einsatzmöglichkeiten bietet. Der mit Polyester-Polyolen versetzte PIR-Schaum wird zum Beispiel verwendet für die Wärmeisolation von Gebäuden, Behältern und Kühlschränken, aber ebenso für die akustische Isolation sowie wasserdichte Beschichtungen und Membranen. Gefärbter Schaum wird dabei hauptsächlich an Stellen eingesetzt, wo er nicht zu sehen ist.

Energetische Verwertung

Neben dem chemischen oder mechanischen Recycling könnten PET-Flaschen auch für eine energetische Verwertung verwendet werden. Hierfür müssen sie dem Prozess der Pyrolyse unterzogen werden, welche das PET-Polymer in eine Mischung von Kohlenwasserstoffen umwandelt. Diese werden dann in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet zur Energie- und Wärmegewinnung.

Ökologische Bilanz von Recycling und energetischer Verwertung

Bei den unterschiedlichen Verwertungsmethoden muss untersucht werden, welche davon ökologisch betrachtet besser sind. Hierfür sollen die Energieeinsparung und die Einsparung klimarelevanter Emissionen beim Recycling von Kunststoff mit der Verwertung in Müllverbrennungsanlagen verglichen werden. Bei der ökologischen Betrachtung wird der Aufwand, der beim Recycling betrieben wird, um die Abfälle zu sortieren und zu verwerten, mit dem Aufwand verglichen, der betrieben werden muss, um ein funktionsgleiches Produkt aus primären Rohstoffen herzustellen. Das Verwertungssystem betrachtet dabei den Aufwand des Recyclings, ein Äquivalenzsystem untersucht die Gutschriften des Verfahrens gegenüber der Herstellung neuer Produkte. Dabei werden zum Beispiel der Ressourcenverbrauch an Erdöl, Erdgas oder Kohle und die klimarelevanten Emissionen an Kohlendioxid, Methan oder Stickoxiden betrachtet um festzustellen, ob sich netto beim Recycling eine Entlastung oder eine zusätzliche Belastung der Umwelt ergibt.

Ergibt sich ein negativer Nettobetrag (ist also die Gutschrift für Einsparungen gegenüber der Neuherstellung größer als der Aufwand des Recyclings), so ist die Umweltbelastung beim Recycling vermindert. Ist der Aufwand größer als die Gutschrift und ergibt sich damit ein positiver Nettobetrag, werden die Umweltlasten durch das Recycling – entgegen der eigentlichen Zielsetzung der Wiederverwertung von Müll – sogar noch erhöht.

Im Falle von Kunststoff hat das Recycling einen eindeutig negativen Nettobetrag. Die Energieeinsparung des Recyclings gegenüber der Müllverbrennung liegt in etwa bei einem Faktor von 1,8. Außerdem werden je Tonne recyceltem Kunststoff 1,26 Tonnen CO_2-Äquivalente gegenüber einer Behandlung in einer Müllverbrennungsanlage eingespart. Ökologisch betrachtet ist also eine Verwertung einer Verbrennung in jedem Falle vorzuziehen. Dabei ist das mechanische Recycling dem chemischen ökologisch betrachtet überlegen und das chemische Recycling ist vom ökologischen Standpunkt aus besser als eine energetische Verwertung.

Verwendung von recyceltem PET

Die (in diesem Modell vorwiegend mechanische) Verwertung von PET kann auf mehreren Wegen erfolgen. Beim Stoffkreislauf des PET-Recycling wird zwischen einem offenen Kreislauf („open loop“) und einem geschlossenen Kreislauf („closed loop“) unterschieden. Beim geschlossenen Kreislauf wird das PET-Rezyklat zur Herstellung neuer PET-Flaschen verwendet und ersetzt dort neues PET. Diesen „closed loop“ nennt man auch „bottle-to-bottle“.

Beim offenen Kreislauf wird neues PET eingespart, indem das recycelte PET für die Herstellung anderer Produkte wie Textilien, Zelte, Rucksäcke, Taschen oder sonstige Fasern genutzt wird. Dieser Stoffstrom wird als offener Kreislauf bezeichnet, weil das PET danach meist nicht in den Kreislauf zurückkehrt, allerdings haben die so entstandenen Produkte auch eine längere Lebenszeit als beim geschlossenen Kreislauf.

Am ökologisch günstigsten ist eine Verwertung des PET im „closed loop“. Hier können neue PET-Flaschen aus 40-80% mechanisch recyceltem PET bestehen. Da für Lebensmittelverpackungen strenge Hygienevorschriften gelten, wird das mechanische Rezyklat allerdings nur in den Zwischenlagen einer mehrschichtigen PET-Flasche verwendet; die Schichten, die in Kontakt mit der Umwelt oder dem Inhalt gelangen, bestehen aus neuem PET. Beim chemischen Recycling hingegen kann eine neue Flasche aus bis zu 100% recyceltem PET bestehen, weil das alte Material bei der Wiederverwertung in seine Monomere abgebaut wird, die sich von denen, welche aus Erdöl oder Erdgas gewonnen werden, nicht unterscheiden.

Der größte Teil des mechanisch recycelten PET jedoch wird im offenen Kreislauf zu Fasern verarbeitet. 2009 wurde 40% des wiederverwerteten PET zu Fasern umgewandelt. Fasern mit größerem Durchmesser oder unerwünschter Farbe aus gefärbten PET-Flaschen werden verwendet, um Jacken, Schlafsäcke oder Spielzeug auszustopfen. Fasern kleinerer Durchmesser werden zu Fleece verarbeitet, welches ein beliebter Stoff für diverse Bekleidungsstücke und

besonders Sportkleidung ist. Die entstehenden Produkte können hierbei aus bis zu 100% PET-Rezyklat bestehen. Eine Jacke aus Fleece besteht dabei aus etwa 25 recycelten PET-Flaschen.

Etwa 27% des recycelten PET wird zu Verpackungen wie zum Beispiel vorgeformten Plastikboxen zum Verpacken von Obst verarbeitet. Hierzu zählt auch der geschlossene Kreislauf, bei dem aus Flaschen wieder neue Flaschen gefertigt werden. In Europa wurde 2009 etwa 22% des recycelten PET zur Produktion von Behältern aller Art verwendet.

Weitere Anwendungen mit wachsenden Märkten sind zum Beispiel Polyurethanschäume, die auch Polyester-Polyole aus PET-Flakes enthalten, oder veränderte Kunststoffe zur Herstellung von Computer- oder Autoteilen.

Abbildung 4 Darstellung des "Closed Loop" beim Recycling von PET 1. „Preform" der PET-Flasche, wird noch zu handelsüblicher PET-Flasche aufgeblasen 2. Verwendung der PET-Flasche 3. Rücknahme der verwendeten PET-Flaschen und Wiederverwertung 4. Recycling zum Rohmaterial (PET-Flakes)

4.7 Diskussion

In den vielen Schritten, die nötig sind um PET-Recycling sinnvoll, energiesparend und flächendeckend durchführen zu können, gibt es viele „Bottlenecks".

Der erste kritische Punkt ist die Rückgabe des PET. Aufgrund des 2003 eingeführten Flaschenpfands für PET-Flaschen mit kohlensäurehaltigem Inhalt oder Mineralwasser wird in Deutschland der Großteil dieser Flaschen der Wiederverwertung zugeführt. Die Pfandpflicht gilt jedoch nicht für alle PET-Flaschen, zu denen auch Saftflaschen, Kosmetik- oder

Medikamentenbehälter zählen. Diese werden über das Duale System (der „Grüne Punkt“) zurückgenommen. In der Schweiz zum Beispiel wird mit einem flächendeckenden Sammel- und Rücknahmesystem ohne Pflichtpfand eine Rücklaufquote von 78% erreicht.

Das mechanische Recycling, bei dem gebrauchte PET-Flaschen gereinigt und in neue Flaschen umgeschmolzen werden, ist nach der einfachen Wiederverwendung und Neubefüllung die effektivste und umweltschonendste Verwertungsmethode. Allerdings ist diese auch ziemlich anfällig gegenüber Verunreinigungen des Ausgangsmaterials, vor allem was Kontamination mit anderen Kunststoffen betrifft. Diese erfolgt zumeist durch die Verschlusskappen oder die Etiketten der Flaschen. Ein möglicher Lösungsvorschlag hierfür wäre, auch die Verschlusskappen aus PET zu fertigen. Eventuell gibt es hierbei aber auch technische Probleme, die sich dem außenstehenden Betrachter nicht erschließen, da dies in der Praxis nicht umgesetzt wird. So werden die Kontaminationen soweit es geht, entfernt, oder - bei zu stark kontaminiertem Ausgangsmaterial - das PET mittels chemischem Recycling wiederverwertet, da hier Verunreinigungen zu einem wesentlich höheren Grad toleriert werden können.

Ein weiteres Problem beim Recycling sind die Farbstoffe, die vielen PET-Flaschen zugesetzt werden. Zum einen müssen die Flaschen nach Farbe sortiert werden, bevor sie wiederverwertet werden können. Zum anderen können gefärbte Kunststoffe nicht dazu verwendet werden, um durch mechanisches Recycling wieder PET-Flaschen daraus zu gewinnen. Eine Rückführung in eine PET-Flasche ist dann nur über chemisches Recycling mit einem Verfahren möglich, welches die Farbstoffe entfernt. Ansonsten wird das gefärbte PET zumeist zur Herstellung anderer Produkte wie Textilien, Fasern oder Polyurethanschäume verwendet, wo die Färbung keinen so großen Nachteil darstellt.

Bei einigen Produkten wie zum Beispiel Fruchtsäften ist es vorteilhaft, die Flaschen braun zu färben, um den Inhalt vor lichtbedingter Veränderung zu schützen. Viele Farben sind jedoch nicht zwingend notwendig und dienen lediglich der optischen Aufwertung der Flasche. Umweltfreundlicher wäre also, auf nicht notwendige Färbung der Flaschen zu verzichten.

5. Elektronikgeräte im Stoffkreislauf

Simon Filser

Auf der ganzen Welt ist Elektronikschrott die Abfallsorte, deren Menge am schnellsten wächst. Das ist besorgniserregend, weil er viele Schwermetalle, Flammschutzmittel und andere Giftstoffe enthält. Ein großes Problem dabei ist, dass er oft nicht getrennt entsorgt wird, sondern im normalen Hausmüll landet. Besonders in vielen Staaten außerhalb der EU sind die Möglichkeiten und das Bewusstsein zur Mülltrennung kaum vorhanden.

Allerdings gibt es, falls der Elektronikschrott von anderen Müllfraktionen getrennt wird, auch immer mehr Möglichkeiten, wertvolle Rohstoffe – besonders Metalle und Kunststoffe – wieder aus dem Schrott zu extrahieren. Im Folgenden sollen einige wichtige Aspekte dieses Themas diskutiert werden.

5.1 Entwicklung der Schrottmenge

Der Elektronikschrott ist die derzeit am schnellsten wachsende Abfallfraktion. Weltweit nimmt das Aufkommen um etwa 3% bis 5% jährlich zu, was nicht nur am Wirtschaftswachstum liegt. Auch durch die sinkende Lebensdauer von Elektronikgeräten steigt die entstehende Abfallmenge stark an.

Momentan wird das gesamte weltweite Aufkommen auf etwa 40 Mio. Tonnen geschätzt, was ca. 6 kg pro Kopf bedeutet. Für Deutschland wird der Wert zwischen 1,1 und 1,8 Mio. Tonnen geschätzt, weil auch hier keine verlässlichen Daten vorliegen.

Beispielhaft wird im Folgenden die Zusammensetzung von Mobiltelefonen dargestellt, die in Deutschland etwa 0,2% des anfallenden Elektronikschrotts ausmachen.

5.2 Zusammensetzung eines Mobiltelefons

Wie Abbildung 5 zeigt, besteht ein typisches Mobiltelefon aus einer Vielzahl von Stoffen, deren Verhältnis von Modell zu Modell unterschiedlich ist und beispielsweise davon abhängt, ob das Gerät eine Kamera, einen besonders großen Akku oder ein größeres Display besitzt. In der ersten Grafik sind nur die Stoffe gesondert erwähnt, die entweder einen besonders großen Anteil an der Masse haben oder in sonstiger Weise von besonderem Interesse sind.

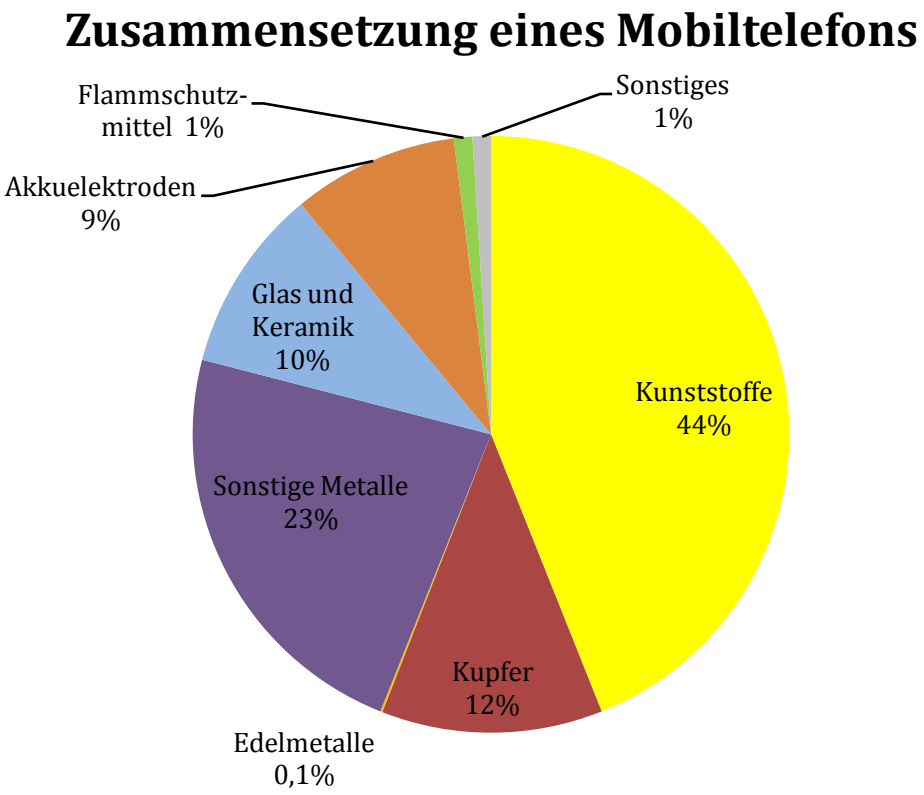

Abbildung 5: Zusammensetzung eines Mobiltelefons[6]

Für den finanziellen Wert sind aber die Metalle entscheidend. Wie man in Abbildung 6 erkennen kann, machen die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium sowie Kupfer und Cobalt den wichtigsten Teil des Werts aus. Die zu Grunde gelegten Preise stammen vom 5.5.2011. In Mobiltelefonen werden Gold und Silber für Kontakte und integrierte Schaltkreise, Palladium für Kondensatoren, Kupfer für Kabel und Elektromotoren und Cobalt für Lithiumionenakkus verwendet. Daneben sind noch weitere größtenteils seltene Metalle wie Lithium (Akkus), Indium (Display), Ruthenium (Festplatten, der Vollständigkeit halber erwähnt), Zinn (Lötstellen), Yttrium (Display), Europium (LEDs), Blei, Cadmium, Antimon (inzwischen verboten, aber in alten Geräten noch enthalten) und einige andere enthalten. Der absolute Wert dieser Stoffe ist jedoch relativ gering, weil sie oft nur in Spuren verwendet werden und deshalb ist momentan ein Recycling dieser Stoffe noch wenig wirtschaftlich.

[6] http://www.nokia.de/nokia/umwelt/we-create/materialien-und-inhaltsstoffe, aufgerufen am 13.5.2011

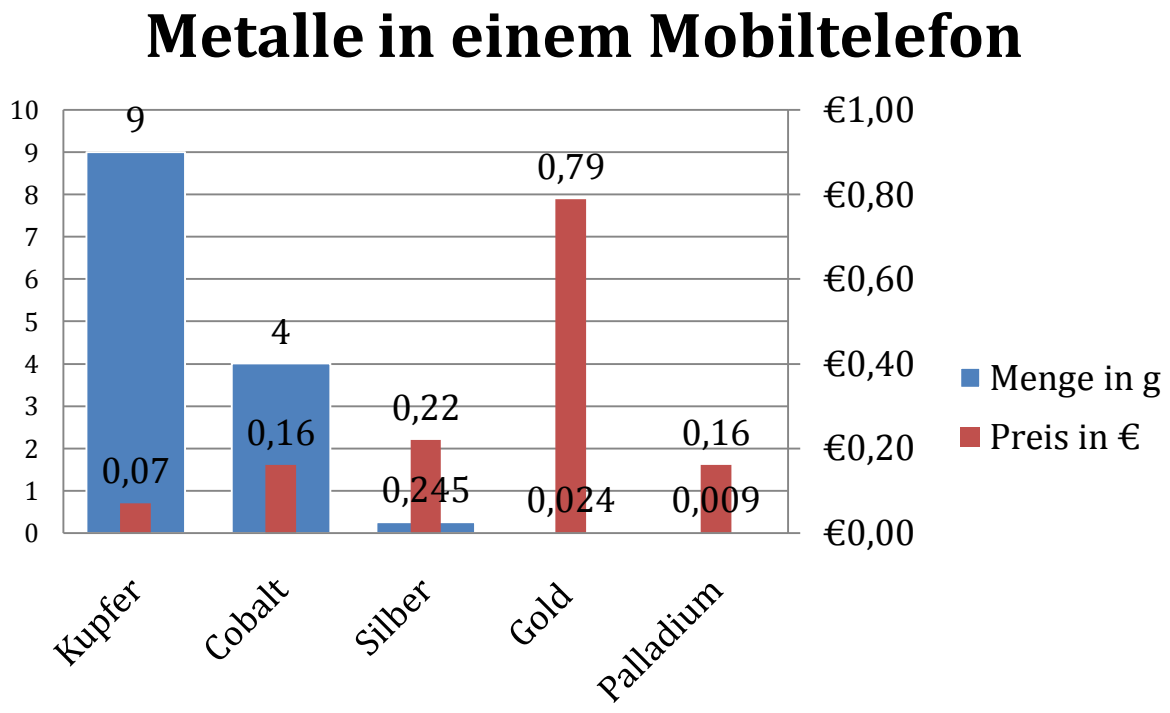

Abbildung 6: Die wichtigsten in einem Mobiltelefon enthaltenen Metalle[7]

5.3 Recycling von Elektronikschrott

Technologische Diversität

Bevor auf einzelne Verfahren beispielhaft eingegangen wird, sollte betont werden, dass es anders als bei anderen Wertstoffen für Elektronik- und Elektroschrott kein einheitliches Recyclingverfahren gibt, das flächendeckend angewandt wird. Einerseits unterscheiden sich die Geräte deutlich in ihren Eigenschaften – eine Waschmaschine erfordert eine ganz andere Behandlung als ein Computer und enthält auch andere Stoffe. Andererseits entwickelt sich die Elektronikschrottrecycling-Branche rasant und viele Technologien existieren nebeneinander.

Sehr groß sind auch die Unterschiede in den Methoden, die in verschiedenen Ländern angewandt werden. Während Deutschland weltweit eines der ausgefeiltesten Recyclingsysteme besitzt und auch die anderen EU-Staaten gemäß WEEE[8]-Richtlinie Elektroschrott getrennt sammeln, sind primitive Methoden, die auf der Verbrennung des Schrotts basieren, in vielen Entwicklungsländern sehr weit verbreitet (Siehe auch Kapitel 2.3.2.).

Bei den Verfahren, die im Folgenden behandelt werden, handelt es sich also keineswegs um die weltweit gängige Praxis, sondern um den momentanen Stand der Technik.

[7] http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability, aufgerufen am 5.5.2011

[8] WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment (Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall)

Wichtige Verfahren

Generell steht bei allen verwendeten Recyclingverfahren die Auftrennung des Schrottgeräts in seine Bestandteile und Materialien im Mittelpunkt. Doch bevor mit dem eigentlichen Recycling begonnen werden kann, muss der Elektroschrott zuerst getrennt von anderen Abfallfraktionen vorliegen. Dazu wird er innerhalb der EU von den Kommunen in 5 verschiedenen Gerätegruppen gesammelt (z. B. „Kühlgeräte“, „Haushaltsgroßgeräte, automatische Ausgabegeräte“ wie z. B. Waschmaschinen, oder "Informations- und Telekommunikationsgeräte und Geräte der Unterhaltungselektronik", zu denen auch die Mobiltelefone gehören, die hier exemplarisch behandelt werden).

Eine andere Methode wäre die maschinelle Trennung, die bei der Einführung einer Werstofftonne (zur gemeinsamen Sammlung von Verpackungen, Kunststoffen und Elektrokleingeräten) zum Einsatz kommen würde. Momentan wird dieses System aber nur im kleinen Maßstab getestet. Deshalb ist weiterhin jeder Verbraucher verpflichtet, seinen Elektroschrott bei den Kommunen abzugeben.

Die nach Kategorie getrennten Altgeräte werden dann in eine entsprechende Recyclinganlage transportiert, wo sie zuerst zerkleinert werden. Bei großen Geräten ist oft eine manuelle Vorzerlegung sinnvoll, kleinere Geräte werden in heutigen Anlagen jedoch automatisch zerkleinert. Ein relativ neues Verfahren, das bisher noch kaum eingesetzt wird, ermöglicht Recyclingquoten von etwa 95%[9] während vom Gesetzgeber für Telekommunikationstechnik 85% vorgeschrieben sind. Es wird hier als ein momentan technologisch führendes Bespiel näher beschrieben. Die Reihenfolge der Zerkleinerungs- und Trennungsschritte muss nicht zwangsläufig so sein wie im Folgenden beschrieben, einige Schritte werden auch mehrmals durchgeführt.

Bei dieser Technologie werden zuerst große Kunststoffteile, wiederverwendbare Teile, Batterien, Bildröhren, Glasplatten und Ähnliches per Hand demontiert. Das verbleibende Material wird dann mit Hilfe von Hammer- oder Rotorprallmühlen zerkleinert, was für Kunststoffe jedoch nur unterhalb einer bestimmten Teilchengröße (ca. 3 mm Durchmesser) möglich ist, ohne die Teile lediglich zu verformen.

Zur Trennung von Kunststoff-, Metall- und Verbundstoffteilen werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Eines davon ist die Röntgentransmission. Das heißt, die Einzelteile werden mit Röntgenstrahlung durchleuchtet, die je nach Dichte des Materials unterschiedlich gut durchgelassen wird. Das entstehende Bild wird per Computer ausgewertet und verwertbare Teile

[9] http://www.patent-de.com/20081120/DE102006034692B4.html, aufgerufen am 8.5.2011

mit Druckluft ausgelenkt. Da chlorhaltige Kunststoffe wie etwa PVC etwas dichter sind als andere, lassen sie sich gut erkennen und abtrennen. Sie sollen insbesondere nicht verbrannt werden, da sonst giftige Stoffe, insbesondere Dioxine entstehen können.

Eine ähnliche Trennmethode charakterisiert die Materialien optisch nach Korngröße, Form oder Oberfläche und trennt sie danach. Auch lassen sich verschiedene Kunststoffe über ihr Infrarotspektrum unterscheiden.

Außerdem können größere Metallteile magnetisch per Induktion abgetrennt werden. Eisenteile, die selbst magnetisch sind, werden anders abgelenkt als Nichteisenmetalle, die durch den in ihnen induzierten Strom als kleine Elektromagneten wirken. Kunststoffe werden dagegen gar nicht abgelenkt.

Für kleinere Einzelteile verwendet man zur Trennung meist einen Windsichter, der das Verhältnis von Luftwiderstand zu Schwerkraft benutzt, indem das Material in einen konstanten Gasstrom eingeführt wird, der nach oben bläst. Schwerere Teile fallen nach unten, leichte fliegen nach oben.

Die Abluft enthält noch eine Menge Staub, der durch Filtration der Luft abgetrennt wird und wieder in den Prozess eingeschleust werden kann.

Schließlich können die entstehenden Stofffraktionen, insbesondere Metalle und Kunststoffe, wieder an andere Industrieunternehmen verkauft und dort weiterverwendet werden.

5.4 Probleme beim Elektronikschrottrecycling

In Elektronikgeräten enthaltene Gefahrstoffe

Elektronische Geräte enthalten verschiedene Stoffe, die besonders bei der Verbrennung zu erheblicher Umweltverschmutzung führen. Das sind zum Einen Schwermetalle wie Quecksilber, Blei und Cadmium, die zwar in der EU seit 2006 durch die RoHS-Richtlinie verboten, aber in Altgeräten trotzdem noch vorhanden sind. Zum Anderen enthalten die verwendeten Kunststoffe Flammschutzmittel wie PCB (Polychlorierte Biphenyle), PBDE (Polybromierte Diphenylether) oder TPP (Triphenylphosphat). Diese führen dazu, dass die Geräte nicht so schnell Feuer fangen, sondern erst bei hohen Temperaturen zu schwelen beginnen. Dann entwickeln sich allerdings bedenklichere Verbindungen. Dazu kommen viele weitere Stoffe wie Antimon, Weichmacher (Phthalate/ Phthalsäureester) oder PVC (Polyvinylchlorid). Werden halogenhaltige Kohlenwasserstoffe verbrannt, können Dioxine und Furane entstehen, die zu den giftigsten bekannten Stoffen gehören. Bei der offenen Verbrennung werden viele der erwähnten Stoffe bzw. ihre Verbrennungsprodukte in Luft, Boden und Wasser freigesetzt.

Inoffizielle Recyclingpraktiken in Entwicklungsländern

Ein großes Problem, das zwar relativ bekannt, aber trotzdem schwer handzuhaben ist, liegt im enormen illegalen Export von Elektronikschrott in Entwicklungsländer in Asien und Westafrika, wo, fast ohne ökologische Richtlinien beachten zu müssen, riesige Mengen einfach verbrannt werden, um an enthaltene Metalle zu gelangen, die wieder verkauft werden. Die dabei entstehenden Gase und Stäube stellen jedoch eine große Gefahr für die Umwelt und Gesundheit der an der Verarbeitung beteiligten Menschen dar. Außerdem führt diese Art der Rohstoffgewinnung zu einer schlechten Ausbeute der enthaltenen Rohstoffe.

Die Gründe für diese Praxis sind in erster Linie finanzieller Art, weil eine fachgerechte Entsorgung der Elektronikaltgeräte in Industriestaaten mit einem großen Aufwand verbunden ist, um schädliche Emissionen einzudämmen und die am Recycling beteiligten Arbeitskräfte vor gesundheitlichen Schäden zu schützen. Die Vorschriften in den meisten Entwicklungsländern sind sehr viel weniger streng und werden oft auch nicht kontrolliert. Dadurch wird es für die beteiligten Firmen rentabel, die Geräte fälschlicherweise als Gebrauchtgeräte zu deklarieren, zu verschiffen und dort zu deponieren, wo sie für Müllsammler zugänglich sind.

Verschiedene Studien (z.B. von Greenpeace 2008 in Ghana[10]), belegen, dass sehr viele verschiedene Giftstoffe in der Umgebung von Elektronikschrott-Recyclingstätten die natürlichen Hintergrundwerte um ein Vielfaches (für Blei oft um das Hundertfache) überschreiten. Allerdings ist es kaum möglich, zu quantifizieren, ob und wie viele Menschen in den betroffenen Regionen tatsächlich erkranken.

In der Praxis ist es aber sehr schwierig, den illegalen Export von Elektronikschrott zu unterbinden. Eigentlich ist er durch das Basler Übereinkommen mittlerweile in allen Industriestaaten außer den USA verboten. Der Export von gebrauchten Geräten ist davon allerdings nicht betroffen, weshalb der Schrott oft als solche deklariert wird und es großen Aufwand erfordern würde, die Funktionsfähigkeit so großer Mengen von Geräten zu überprüfen. Zusätzlich haben gebrauchte Geräte oft nur eine geringe Restlebensdauer, weshalb sie dann bald regulär in den Entwicklungsländern als Schrott anfallen. Trotzdem wird es international nicht als erstrebenswert angesehen, den Handel mit gebrauchten Geräten zu verbieten, weil er Technologietransfer ermöglicht und die Lebensdauer von Geräten verlängert, die bei uns schon

[10] http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/chemie/GhanaEWaste_FINAL.pdf, aufgerufen am 5.5.2011
http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/chemie/Ghana_Science_note_FINAL.pdf, aufgerufen am 5.5.2011

veraltet, aber noch funktionsfähig sind. Das dient dem ersten Ziel der Abfallpolitik, der Müllvermeidung – vorausgesetzt natürlich, es handelt sich um funktionsfähige Ware.

Was auch kaum diskutiert wird, ist der wirtschaftliche Nutzen, den die Arbeiter vor Ort vom Verkauf der extrahierten Metalle haben. Auch wenn sie ihre Gesundheit stark gefährden, sind sie finanziell von dem geringen Einkommen abhängig, das sie durch das Recycling erzielen. Eine Verhinderung des Schrottexports in diese Länder würde die dortige Wirtschaft kurzfristig deutlich schwächen und viele Menschen arbeitslos machen.

Laut einer Studie des Öko-Instituts[11] könnte die Situation deutlich verbessert werden, wenn die bisherigen Recyclingwege umorganisiert würden. Dann würden die Müllsammler die Elektrogeräte vor Ort zerlegen, Kunststoffe manuell entfernen, soweit es möglich ist und die mit Metallen angereicherten Fraktionen weiterverkaufen, ohne die Kunststoffe vorher abzubrennen. Dabei sollten stahl- und aluminiumhaltige Teile im Inland verhüttet werden, Edelmetalle in entsprechenden Anlagen in Industrienationen. Durch die verbesserten Rückgewinnungsquoten könnte der Erlös für die enthaltenen Rohstoffe auf fast das Doppelte steigen, was die Kosten für den vermehrten Transport decken sollte. Dadurch, dass viel weniger Schadstoffe emittiert werden, wäre der Nutzen für die Umwelt groß. Der wirtschaftliche Vorteil wurde in der vorliegenden Studie nur für Desktop-Computer ermittelt, für Röhrenbildschirme würde eine sachgemäße Handhabung zu hohen Kosten für die Beseitigung von Sonderabfällen aus Bildschirmglas führen. Es könnte also nur mit entsprechenden strengen gesetzlichen Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Ähnliches gilt für die FCKW aus alten Kühlschränken.

Dieser Ansatz ist zwar wirtschaftlich sinnvoll und würde die allgemeine Situation wohl erst einmal verbessern. Allerdings könnte damit der illegale Elektroschrottexport in entsprechende Länder weiter angekurbelt werden, weil die Renditen steigen. Das ist langfristig jedoch nicht verantwortbar. Wenig rentable Fraktionen dagegen würden eher vernachlässigt werden und sich dort ansammeln. Außerdem ist die Recyclingbranche ständig in schnellem Wandel, was Preise und Techniken anbelangt. Langfristige Investitionen sind deshalb mit einem gewissen Risiko verbunden.

Ständige Veränderung des Recyclingmarkts

Dieser Wandel kommt zum einen daher, dass sich die Geräte, die als Abfall anfallen, sehr schnell weiterentwickeln. Beispielsweise haben LCD-Monitore die Röhrenbildschirme in den letzten 10 Jahren fast vollständig vom Markt verdrängt, sie enthalten aber deutlich andere

[11] http://www.oeko.de/oekodoc/1058/2010-106-de.pdf, aufgerufen am 5.5.2011

Bauteile und Materialien, was andere Recyclingtechnologien erforderlich macht. Davon abgesehen entwickeln sich fast alle elektronischen Geräte in schnellem Tempo weiter, was auch oft den Austausch bestimmter Materialien zur Folge hat. Begrüßenswert ist etwa, dass viele Gefahrstoffe durch die RoHS-Richtlinie[12] verboten werden oder einige Edelmetalle in geringeren Mengen als früher verbaut werden. Da jedoch Geräte jeden Alters entsorgt werden, muss mit immer mehr verschiedenen Stoffen gerechnet werden, während der Anteil der Edelmetalle langfristig tendenziell abnimmt. Deshalb können Verbote verschiedener Schadstoffe zwar die Belastung der Recyclingprodukte reduzieren, die Prozesse müssen jedoch auf alle Gerätegenerationen ausgelegt sein, was eventuelle Kostensenkungen (z. B. durch Verzicht auf eine FCKW-Entsorgung bei Kühlschränken) stark einschränkt. Immer strengere Emissionsgrenzwerte für viele Schadstoffe machen die Prozesse zusätzlich komplizierter.

Mittlerweile gibt es eine große Zahl an Technologien, die beinahe jeden Stoff in beliebiger Reinheit zurückgewinnen lassen, die damit verbundenen Kosten sind aber vielfach sehr hoch. Welche Technik den Weg zur Umsetzung schafft, hängt allerdings nicht nur von Kosten des Verfahrens ab, sondern auch von den gesetzlichen Rahmenbedingungen und dem aktuellen Preis des jeweiligen Rohstoffs. Die hohe Volatilität der Rohstoffmärkte macht eine langfristige Planung allerdings sehr schwierig, da Verfahren, die momentan noch rentabel wären, sich schon in kurzer Zeit nicht mehr rechnen könnten.

[12] http://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2002/95/EG_(RoHS), aufgerufen am 5.5.2011

6. Kennzeichnung mittels RFID Transpondern

Nikolas Tekles

Ziel ist es, das Recycling von Altelektronikgeräten zu erleichtern, um die Recyclingprozesse effizienter und somit rentabler zu gestalten. So lassen sich die Anforderungen des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) leichter erfüllen und die Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten, die laut ElektroG für die Verwertung ihrer Produkte aufkommen müssen, können ihre Entsorgungskosten senken. Außerdem ist die inländische Industrie durch die Gewinnung von Sekundärrohstoffen unabhängiger von Rohstoffimporten und das Recycling in Deutschland verhindert den illegalen Export von Elektroschrott ins Ausland.

Das im Folgenden beschriebene Konzept sieht den Einsatz von RFID-Transpondern in Elektronikgeräten vor, um das Recycling von Altgeräten effizienter zu gestalten[13].

RFID steht für „Radio Frequency Identification“. Diese Technologie ermöglicht es, berührungslos und ohne Sichtkontakt Objekte zu identifizieren. Neben der reinen Identifizierung eines Objektes können auch Zusatzdaten auf dem RFID-Transponder gespeichert werden. Die RFID-Technologie wird beispielsweise für Produktidentifikation, elektronische Wegfahrsperren und automatische Zeiterfassung[14] verwendet.

Wären Elektronikgeräte einheitlich mit der RFID-Technologie ausgestattet, könnten auf einem Transponder alle Daten gespeichert werden, die für das Recycling des entsprechenden Produktes relevant sind. Außerdem könnte man mit Hilfe des Transponders ein Sammel- und Entsorgungskonzept einführen, das die Hersteller von Elektronikartikeln motiviert, ihre Produkte recyclingfreundlicher zu gestalten. Diese Vorteile werden im Folgenden näher erläutert.

6.1 Vorteile des Konzeptes

Die wichtigste auf dem Transponder gespeicherte Information ist ein eindeutiger Identifizierungsschlüssel für den Hersteller des Produktes, aber auch für das Produkt selbst. Sinnvoll wäre auch die Speicherung zusätzlicher Daten wie verwendete Materialien, anzuwendende Trenn- und Demontageverfahren oder das Gewicht[15] des Produktes. Diese Daten

---

[13] H MARTENS: *Recyclingtechnik;* S. 282; Spektrum Akademischer Verlag, Berlin 2010

[14] G TAMM, C TRIBOWSKI: *RFID-Informatik im Fokus;* S. 2; Springer-Verlag, Berlin 2010

[15] Die Information über das Gewicht des Produktes könnte man nutzen, um zwei verschiedene Berechnungsverfahren für die vom Hersteller zu leistenden Entsorgungskosten anwenden zu können, je nachdem, ob es sich um Altgeräte handelt, in denen ein Transponder verbaut ist oder nicht. Siehe auch: Erweitertes Sammel- und Berechnungssystem.

könnten beim Eingang in den Recyclingbetrieb ausgelesen und für den Recyclingprozess genutzt werden.

Nach der Identifikation der Geräte wäre eine Trennung der Geräte nach Recyclingeigenschaften möglich. So könnte man schon vor der mechanischen Zerkleinerung des Schrotts (z.B. Schreddern) Geräte mit gleichartigen Gehäusematerialien trennen. Das würde die nach der Zerkleinerung erfolgende Klassierung der Kunststoffe ersetzen oder zumindest erleichtern. Außerdem wäre die Anwendung spezieller Lösungsmittel zur Rückgewinnung sortenreiner Kunststoffe und zur Abtrennung von Flammschutzmitteln möglich (z.B. mithilfe des CreaSolv-Verfahrens), wenn die Information über das einzusetzende Lösungsmittel zuvor aus dem Transponder ausgelesen wird.

Darüber hinaus könnte man Informationen über die Demontage auf dem Transponder speichern und so die Zerlegbarkeit des Altgerätes erleichtern und eventuell sogar eine Automatisierung des gesamten Recyclingprozesses ermöglichen[16]. Eine zerstörungsfreie Demontage kann zusätzlich die Wiederverwendbarkeit bestimmter Bauteile ermöglichen. Auf den Transpondern von Kleinelektronikgeräten könnte man Lageinformationen einer Sollbruchstelle des Gehäuses speichern. In Verbindung mit einer geeigneten Gestaltung des Produktes ließen sich so Gehäuseteile und innere Bauelemente leicht trennen, ohne dass letztere beschädigt würden.

In Kombination mit einem neuen Sammel- und Entsorgungskonzept könnten die Recyclingkosten, für die die Hersteller der Altprodukte aufkommen müssen, individuell abgerechnet werden und somit ein finanzieller Anreiz geschaffen werden, Produkte recyclingfreundlicher zu gestalten. Eine solche Maßnahme ist ein Beispiel für ein ökonomisches Instrument zur Umsetzung von Produktverantwortung[17].

Dazu müsste man zunächst die Recyclingkosten jedes Produktes nach einem Schema bemessen, das die Produkte gemäß ihrer Recyclingfähigkeit kategorisiert. Als Bewertungskriterien könnten Materialvielfalt und Art der Materialien, sowie Anzahl der Fügeverbindungen und Zerlegbarkeit des Produktes herangezogen werden. Zusätzlich zur Speicherung auf dem Transponder soll die aus den Kriterien abgeleitete „Entsorgungskategorie“ auch anhand eines Siegels erkennbar sein (s. Kapitel 7).

Ein Vorschlag für ein solches Entsorgungskonzept wird später unter der Überschrift „Erweitertes Sammel- und Verwertungskonzept“ diskutiert. Teil der dort erläuterten Idee ist ein zentrales Datenbanksystem, das die erfassten Daten speichert.

---

[16] In der Regel erfolgt die Demontage in den Recyclingbetrieben manuell

[17] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: *Umweltgutachten 2008*, S. 442

Neben der Speicherung recyclingrelevanter Informationen könnte man den Transponder auch anderweitig nutzen. Beispielsweise könnten Wartungsintervalle und Service-Leistungen gespeichert werden. Ein Transponder kann im Einzelhandel auch zur Diebstahlsicherung verwendet werden und das Einscannen der Artikel an der Kasse ersetzen. Der Kunde schiebt seinen Einkaufswagen einfach an einem Erfassungssystem vorbei, anstatt jeden Artikel einzeln auf das Fließband zu legen und einzeln einscannen zu lassen.

6.2 Technische Details

Für die RFID-Kommunikation sind ein Empfänger (Lesegerät) und ein Sender (Transponder) notwendig. Das Lesegerät sendet hochfrequente elektromagnetische Signale an den Transponder. Der Transponder besteht aus einer Antenne und einem Mikrochip, der in der Lage ist, Befehle vom Lesegerät zu verarbeiten und darauf zu reagieren. Man unterscheidet zwischen aktiven Transpondern mit eigener Stromversorgung und passiven Transpondern, in denen der Mikrochip mit der Energie der über die Antenne empfangenen elektromagnetischen Strahlung betrieben wird. Durch definierte Modulation der empfangenen Strahlung ist ein Transponder in der Lage, die abgefragte Information an das Lesegerät zurückzusenden. Für den hier geforderten Anwendungszweck sind nur passive Transponder ohne eigene Stromversorgung relevant.

Größe und Kosten eines Transponders hängen von der speicherbaren Datenmenge und der erforderlichen Geschwindigkeit des Lesevorgangs ab. In einfachen Ident-Systemen kommen Transponder zum Einsatz, die nur wenige Cent kosten und deren Antennen Flächen von wenigen Quadratmillimetern aufspannen.

Im Zusammenhang mit dem Recycling von Elektroschrott ist auch die Art und Vielfalt der in einem Transponder verbauten Materialien interessant. Folgende Tabelle[18] gibt Auskunft über die in passiven RFID-Tags verwendeten Stoffe:

[18] L ERDMANN ET AL: *Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung*; BMU 2009

Komponente	Material	Masse [mg]		
		76,2 mm * 76,2 mm Tag	15 mm * 97 mm Tag	15 mm * 148 mm Tag
Deckschicht	PP	270	65	100
	Papier	525	130	200
Klebstoff	Acrylat	115	30	45
IC	Silizium	0,5	0,5	0,5
ACP	Epoxy-basiertes Material	0,8	0,8	0,8
ACP Metall	Nickel	0,1	0,1	0,1
Antenne	Kupfer	340	105	140
	Aluminium	50	15	20
	Silber (gedruckt)	36,3*	10,9	14,5*
	Bonding Agent (gedruckt)	15,3*	4,6	6,1*
Substrat	PET	410	100	155
Klebstoff	Acrylat	155	40	60
Gesamt	Tag (ohne Deckschicht)	Cu: 1021,4 Al: 731,4 Ag: 733,0	Cu: 286,4 Al: 196,4 Ag: 196,9	Cu: 401,4 Al: 281,4 Ag: 282,0

Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung von heutigen passiven RFID-Tags

Im Allgemeinen kann die Integration eines Transponders in neue Produkte deren Recyclierbarkeit beeinflussen. Im Falle von Elektronikschrott sind diese Auswirkungen allerdings nicht nennenswert, da die in Transpondern verwendeten Stoffe den Komponenten der Elektro- und Elektronikgeräte gleichen.

6.3 Erweitertes Sammel- und Verwertungskonzept

Wie bereits erwähnt, wäre mit Hilfe der über den Transponder erfassten Produktdaten ein Entsorgungskonzept denkbar, das eine individuelle Berechnung der Recyclingkosten eines Produktes ermöglicht. Je nach Recyclingfreundlichkeit wird ein mit einem Transponder ausgestattetes Produkt in eine Entsorgungskategorie eingestuft. Produkte einer recycling-freundlichen Entsorgungskategorie können besser wiederverwertet oder wiederverwendet werden, was günstigere Entsorgungspreise für den Hersteller ermöglicht. Der Hersteller wird

dazu motiviert, seine Produkte recyclingfähig zu gestalten, um eine günstigere Entsorgungskategorie zu erreichen.

Ein großer Nachteil des bisherigen Entsorgungssystems für Elektroschrott besteht darin, dass für die Hersteller der Elektrogeräte nur ein geringer Anreiz besteht, ihre Produkte so zu gestalten, dass sie sich leichter recyceln lassen. Derzeit verwertet ein beauftragtes Entsorgungsunternehmen gleichartige Produkte verschiedener Hersteller. Die Berechnung der Entsorgungskosten basiert auf einer Mischkalkulation. Ein Hersteller, der recyclingfreundliche Produkte anbietet, senkt zwar die Entsorgungskosten, die Kostenvorteile, die aufgrund verbesserter Recyclingfähigkeit entstehen, verteilen sich aber auf alle Hersteller. So profitiert ein Unternehmen nur anteilsmäßig von seinen Bemühungen, gleichzeitig ermöglicht es aber auch der Konkurrenz eine Senkung der Recyclingkosten.

Durch die Verwendung eines Transponders ließe sich aber ein individuelleres Berechnungsverfahren realisieren. Die Sammlung der Altgeräte könnte unverändert erfolgen. Im beauftragten Recyclingunternehmen passieren alle Geräte das Erfassungssystem. Die Kennungen der identifizierten Geräte werden in einer zentralen Datenbank abgespeichert. Anhand der Stückzahlen und Entsorgungskategorien in dieser Datenbank kann das Recyclingunternehmen, z.B. quartalsweise, die Entsorgungskosten vom Produkthersteller einfordern.

Die Grundzüge der Idee eines erweiterten Sammel- und Entsorgungskonzeptes sind in der Abbildung auf der folgenden Seite schematisch dargestellt.

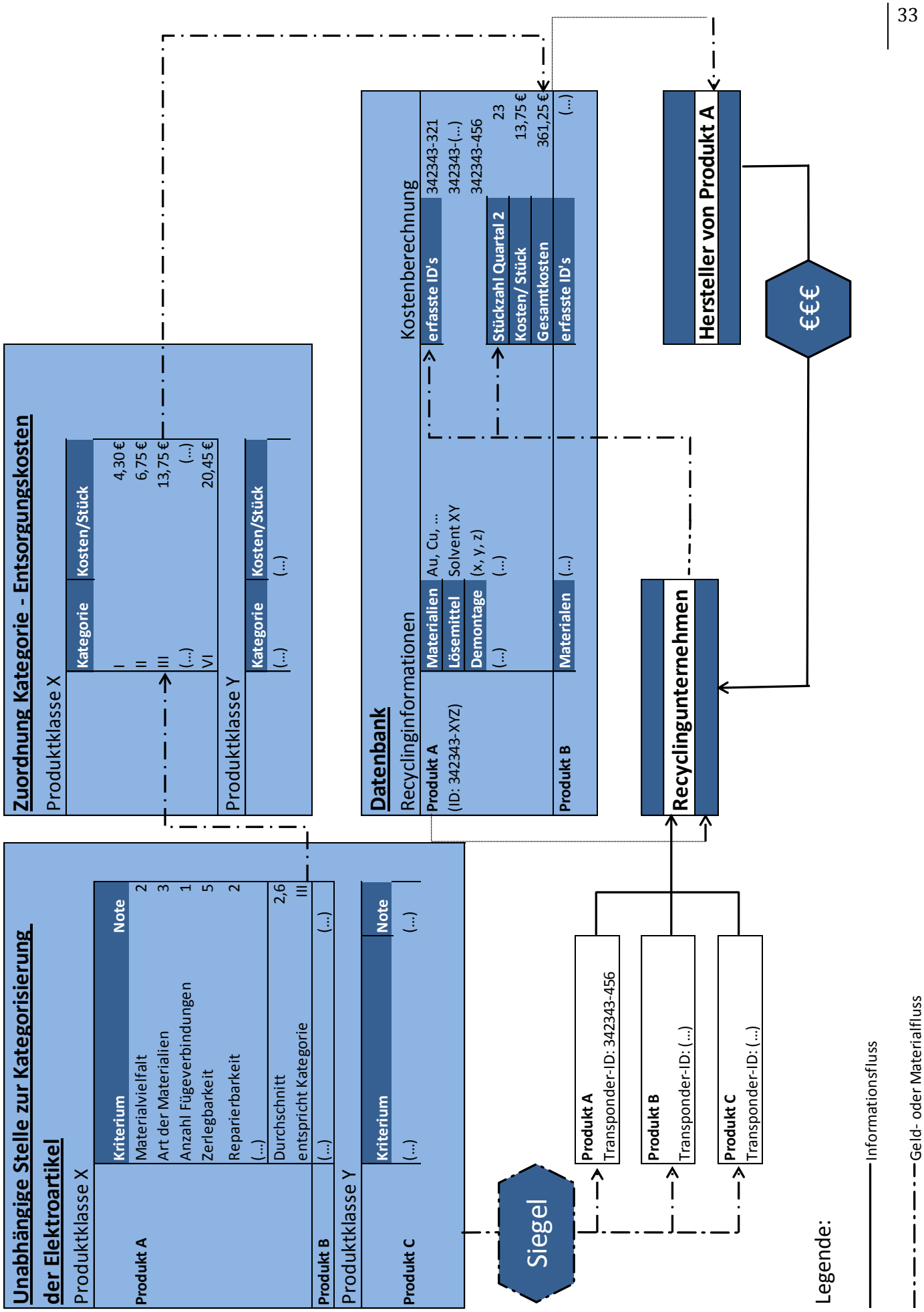

Abbildung 7: Schematische Darstellung des Sammel- und Entsorgungskonzeptes

6.4 Die Konsequenz: Bessere Recyclingfähigkeit der Produkte

Der Hersteller wird versuchen, gerade bei Geräten hoher Stückzahlen eine günstige Entsorgungskategorie und lange Produktlebensdauer zu erreichen. Um jedoch die Anforderungen einer günstigen Entsorgungskategorie zu erfüllen, muss das betreffende Produkt zu einem hohen Maße recycelt werden können. Der Hersteller wird also motiviert, sein Produkt recyclinggerecht zu gestalten und das Prinzip der Produktverantwortung wird effizient umgesetzt. Die Forderung nach einer langen Produktlebensdauer erfordert eine hohe Produktqualität, Zuverlässigkeit und Reparierbarkeit.

6.5 Schwachpunkte des Konzeptes

Das beschriebene Recyclingkonzept erfordert ein sicheres Datenbanksystem, das nicht manipulierbar ist. Denkbar wäre beispielsweise eine internetgestützte Datenbank, auf die auch der Produkthersteller in Form eines Leserechtes Zugriff hat. So kann der Hersteller selbst mitverfolgen, welche Artikel zu welchen Stückzahlen in der laufenden Abrechnungsperiode wiederverwertet werden und die insgesamt anfallenden Recyclingkosten einsehen. Der Kommunikationsaufwand zwischen Recyclingbetrieb und Produkthersteller wird so auf ein Minimum reduziert. Natürlich ist es auch notwendig, dass das Recyclingunternehmen die Inhalte der Datenbank nicht verfälschen kann. Die Erfassung der eingehenden Altgeräte anhand des eindeutigen Identifizierungsschlüssels darf nur durch das automatische Erfassungssystem erfolgen. Entsprechende informationstechnische Sicherheitsmaßnahmen müssten getroffen werden, um Datenmanipulation zu verhindern.

Die Kosten des Transponders selbst dürften den Preis von Elektroartikeln kaum beeinflussen, da die Preise für die einfachen Transponder bei entsprechenden Stückzahlen nur wenige Cent betragen. Jedoch könnten die bessere Wiederverwertbarkeit und Zuverlässigkeit der Produkte zu höheren Produktpreisen führen. Das könnte die Akzeptanz des Konsumenten und somit auch der Hersteller beeinträchtigen. Zudem würden die Spareffekte aufgrund eines erleichterten Recyclings vor allem bei langlebigen Produkten erst verzögert einsetzen, sodass kurzfristig kein Anreiz für den Hersteller besteht, sich dem Konzept anzuschließen.

Zusätzlich könnte sich eine Einigung auf die Abrechnungszeiträume als schwierig herausstellen. Vom Standpunkt des Herstellers und aufgrund eines geringeren Verwaltungsaufwandes wären lange Abrechnungszeiträume vorteilhaft, für das Recyclingunternehmen allerdings wären kurze Abrechnungszeiträume wünschenswert, damit die im Verwertungsprozess entstehenden Kosten schnellstmöglich gedeckt werden können.

Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Produkthersteller das Konzept annehmen. Außerdem müssen alte Produkte ohne Transponder auch weiterhin recycelt werden können. Deshalb ist es notwendig, sowohl das neue als auch das alte Abrechnungssystem parallel zu verfolgen. Dies wäre zwar über eine Massenbilanz im Verwertungsbetrieb möglich, wenn man das Gewicht und die Anzahl der Produkte kennt, die nach dem neuen Abrechnungssystem berechnet werden müssen (sowohl Gewicht des einzelnen Produktes, als auch die Anzahl der Produkte wären mithilfe des Transponders feststellbar). Man müsste den angelieferten Elektroschrott wiegen und davon die Masse der Altgeräte abziehen, für die das neue Abrechnungsverfahren angewendet werden muss. So ist die Masse der Altgeräte bekannt, für die das alte Abrechnungsverfahren zutrifft, und die Recyclingkosten können über eine Mischkalkulation ermittelt werden, wie es derzeit der Fall ist.

Alles in allem steigt der Verwaltungsaufwand im Recyclingunternehmen und der Recyclingprozess wird komplizierter. Der Vorteil der besseren Wiederverwertbarkeit erfordert möglicherweise die Anschaffung neuer Anlagen. Außerdem könnte die Gefahr bestehen, dass im Verwertungsbetrieb Altgeräte mit Transponder absichtlich am Erfassungssystem vorbeitransportiert werden, um höhere Gebühren nach dem alten Abrechnungsverfahren einfordern zu können.

7. Zertifizierung von Elektronikgeräten

Tobias Helbig

Obwohl die Diskussion um Elektronikschrottrecycling seit einigen Jahren intensiv geführt wird, sind die tatsächlichen Anreize an die Hersteller gering, ihre Produkte so zu gestalten, dass sie leicht wiederzuverwenden sind.

Weder ist es für Verbraucher einfach erkennbar, welches Produkt nach dem Ende seiner Lebensdauer gut verwertbar ist, noch können Recyclingunternehmen den Herstellern die verbesserte Recycelbarkeit eines Produkts individuell vergüten (eventuelle Bemühungen würden der gesamten Branche zu Gute kommen und keinen Wettbewerbsvorteil erzeugen). Ein Siegel für Elektronikgeräte, welches die Recycelbarkeit nachweist, kann deshalb die Motivation der Hersteller enorm verbessern, schon bei der Produktentwicklung bestimmte Kriterien zu erfüllen.

Das Siegel soll von einer unabhängigen Stelle individuell für Produkte verliehen werden, welche die Einhaltung der Kriterien überprüft. Dies kann über einen Verein oder die öffentliche Hand organisiert werden. Das Siegel wird entweder permanent und gut sichtbar angebracht oder kann über einen RFID-Transponder (s. Kapitel 6) ausgelesen werden. Durch die Identifizierung des Gerätes beim Recyclingbetrieb können für die Verwertung wichtige Informationen wie die verwendeten Materialien oder eine Anleitung zur stofflichen Verwertung übermittelt werden. Zudem kann auch ein finanzieller Vorteil in Form von niedrigeren Entsorgungskosten für den Hersteller recyclingfreundlicher Produkte erreicht werden.

Bei der Analyse der aktuellen Situation stößt man schnell auf vergleichbare Bemühungen, die Umweltverträglichkeit eines Produktes zu zertifizieren. Allerdings beziehen diese sich jeweils auf beschränkte Teilbereiche des nachhaltigen Stoffkreislaufes.

Das FSC(Forest Stewardship Council)-Siegel beurteilt Holz und Holzfaserprodukte und damit eine ganz bestimmte Produktgruppe. Es beurteilt in erster Linie die Gewinnung des Rohstoffes Holz und den damit verbundenen Eingriff in das Ökosystem Wald. FSC-zertifizierte Produkte

stammen aus Wäldern, die nach „sozialen, ökonomischen und ökologischen Bedürfnissen heutiger und zukünftiger Generationen“[19] bewirtschaftet werden.
Damit konzentriert sich das FSC-Siegel in erster Linie auf die Bereitstellung des Rohstoffes Holz und weniger auf dessen Recycling.

Den Aspekt der Reparierbarkeit bewertet ein vom österreichischen Normungsinstitut eingeführtes Nachhaltigkeitssiegel. Es wird an Geräte vergeben, die „reparaturfreundlich und langlebig“ sind.

Als Kriterien hierfür werden die zerstörungsfreie Öffnung des Gehäuses sowie die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Konstruktionsplänen herangezogen.
Je nach Erfüllung der Anforderungen wird das Siegel mit dem Prädikat „ausgezeichnet“, „sehr gut“ oder „gut“ versehen.

Entscheidend für den Erfolg eines solchen Siegels ist die Akzeptanz der Konsumenten und damit verbunden der Anreiz für den Hersteller, Anstrengungen zu unternehmen die geforderten Kriterien zu erfüllen.
Die folgenden Kriterien spielen für die Recycelbarkeit eine wichtige Rolle und bilden deshalb den ersten Entwurf für einen Kriterienkatalog. Sie sind als übergeordnetes Siegel für die komplette Verwertungskette zu verstehen und sollen dabei ausdrücklich die oben erwähnten Konzepte einschließen, um so die Vielfalt verschiedener Siegel zu begrenzen und dem umweltbewussten Verbraucher eine klare Hilfestellung sein.

Reparierbarkeit

Die effektivste Art der Müllverwertung ist definitiv die Vermeidung von Müll. Bezogen auf Elektronikgeräte bedeutet dies, dass defekte Geräte durch Reparatur sehr viel schneller, preisgünstiger und ressourcenschonender in den Produktkreislauf zurückgelangen können, als über die Recyclingkette.
Welche Eigenschaften sollte ein Produkt erfüllen, um leicht reparierbar zu sein?

- *Einfache, zerstörungsfreie Zerlegbarkeit des Gehäuses.*
  Darunter fallen beispielsweise die Verwendung von Schrauben anstelle von Klebestellen und die gute (automatisierte) Erreichbarkeit der Demontageelemente. Die verwendeten

[19] http://www.fsc-deutschland.de/, aufgerufen am 06.09.2011

Schrauben sollen auch Standardköpfe haben, die keines Spezialwerkzeugs bedürfen. Allerdings ist bei sicherheitsrelevanten Baugruppen sicherzustellen, dass sie nur für Fachpersonal zugänglich sind, um Unfällen vorzubeugen.

- *Prüfbarkeit der Funktionalität von Einzelkomponenten*
  Da in der Regel nur ein geringer Teil der Komponenten defekt ist, ist es ein entscheidender Schritt zur Reparierbarkeit die einzelnen Komponenten effektiv und unabhängig voneinander testen zu können, um so den Defekt zu lokalisieren.
- *Erreichbarkeit einzelner Komponenten*
  Damit eine defekte Komponente ausgetauscht werden kann, muss diese leicht zugänglich sein. Ebenso wie beim Gehäuse sind lösbare Verbindungen vorzuziehen.

Entsorgungswege

Um ein Produkt recyceln zu können, muss es in einen geeigneten Verwertungsbetrieb gebracht werden. Die beste Recycelbarkeit nützt nichts, wenn das Gerät auf einer Mülldeponie oder sogar auf einer wilden Müllkippe im Wald landet.

In diesem Zusammenhang stellt das Leasing als Vertriebsweg eine sehr recyclingfreundliche Lösung dar. Zum einen werden die Geräte in sehr hoher Quote dem Händler zurückgebracht und damit dem Recycling zugeführt. Zum anderen kann das Recycling sehr effizient erfolgen, da der Hersteller seine eigenen Geräte sehr genau kennt und somit auch gezielte Maßnahmen zur stofflichen Verwertung einleiten kann.

- *Hinweisschilder auf dem Gerät.*
  Das Produkt sollte Hinweise tragen, auf welchem Weg es wieder zu entsorgen ist. Dazu zählen beispielsweise die richtige Mülltonne bzw. der Hinweis auf Spezialsammelstellen im Wertstoffhof.
- *Beratung beim Verkauf*
  Schon beim Verkaufsgespräch sollte der Käufer auf die Recycelbarkeit seines Gerätes hingewiesen werden. Neben dem Werbeeffekt für den Verkäufer wird der Nutzer dadurch für eine geeignete Entsorgung sensibilisiert.

Mechanische Zerlegbarkeit

Im Recyclingbetrieb soll das Elektrogerät in seine einzelnen Bestandteile zerlegt werden. Für jedes chemische Bearbeitungsverfahren ist es vorteilhaft, die Stoffe soweit wie möglich vorzusortieren. Diesbezüglich sollten verschiedene Stoffklassen soweit möglich mechanisch

voneinander getrennt werden, ehe weitere Aufbereitungsschritte vollzogen werden. Die gängige Praxis ist aktuell, die Geräte zunächst in einem Schredder zu fragmentieren.

- *Sollbruchstellen*

  Bereiche verschiedener Materialzusammensetzung können mit Sollbruchstellen versehen werden, um die mechanische Trennung zu erleichtern.

- *Komponentenbauweise*

  Durch Verwendung von getrennten Komponenten können diese (ähnlich wie bei der Reparatur) getrennt einer adäquaten Wiederverwertung zugeführt werden. Bezogen auf das Schreddern des Recyclinggutes wird eine Steckverbindung im Schredder aufgebrochen werden, während Schweiß- oder Klebestellen nicht gelöst werden können.

Materialienauswahl

Das Material stellt letzten Endes das Rezyklat dar und ist somit der Kernfaktor für eine recyclinggerechte Konstruktion.

- *Beschränkung der Materialienvielfalt*

  Durch die Begrenzung der Anzahl von verschiedenartigen Stoffen können einfachere und effizientere Trennverfahren zum Einsatz kommen, was nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit des Recyclings erhöht.

- *Verzicht auf Giftstoffe*

  Soweit es die Funktionalität des Gerätes erlaubt, sollten toxische Stoffe vermieden werden, die sowohl bei der Benutzung des Produktes Schaden verursachen können, als auch beim Recycling Probleme bereiten. Ist eine derartige Substanz technisch nicht vermeidbar, so sollte sie möglichst lokal begrenzt und leicht demontierbar angebracht sein.

- *Trennbarkeit von Stoffen*

  Werden zwei Materialien in direktem Kontakt verbaut, so sollte bei der Materialienwahl auf gute Trennbarkeit geachtet werden. Bei Metallen können beispielsweise verschiedene Schmelzpunkte zur automatisierten Trennbarkeit beitragen.

- *Materialbeschaffenheit*

  Alle verbauten Stoffe sollten einzeln nach Recyclinggesichtspunkten beurteilt werden. Idealerweise sind Stoffe zu verwenden, die nach dem Recycling ohne aufwändige Bearbeitungsschritte wieder als Rohstoff zur Verfügung stehen.

Informationsfluss

Um ein Gerät fachgerecht zu entsorgen, müssen dem Recyclingbetrieb die relevanten Informationen über das Gerät vorliegen. Dies kann über eine Identifikation des Gerätes und eine Informationsliste in Form einer Datenbank geschehen, oder durch direkte Weitergabe der Daten mittels eines eingebauten RFID-Chips.

8. Diskussion und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es in Deutschland für viele Abfallfraktionen wie PET, Papier oder Glas sehr gut funktionierende und etablierte Recyclingsysteme gibt.

Auch für die Trenn- und Sammelsysteme für Hausmüll, sowie Elektro- und Elektronikschrott existiert eine Vielzahl von Technologien zur Aufbereitung. Die Herausforderung liegt in der Tatsache, dass eine schwer überschaubare Menge verschiedenartiger Stoffe voneinander getrennt werden müssen, was zu hohem Energie- und Kostenaufwand führt. Dies wird beim Elektronikschrott noch dadurch erschwert, dass einige der Substanzen giftig (z. B. Blei) oder nur in sehr geringen Dosen enthalten sind (z. B. Gold).

Von den existierenden Trennsystemen für Hausmüll hält die Projektgruppe die Wertstofftonne für den vielversprechendsten Ansatz, bei der Verpackungen, Kunststoffgegenstände und Elektronikkleingeräte gemeinsam gesammelt werden.

Bei Elektronikgeräten sollte dagegen für die Hersteller ein Anreiz bestehen, die Produkte von Anfang an recyclingfreundlich zu gestalten, um die rentable Verwertung und Kreislaufwirtschaft zu fördern. Dadurch würden automatisch illegale Exporte mit den einhergehenden Problemen schlussendlich verhindert werden.

Eine unterstützende Methode dazu ist der Einbau eines RFID-Chips in das Gerät, der recyclingrelevante Informationen enthält und die Identifikation des Geräts erlaubt.

Technologisch einfacher ist dagegen die Einführung eines Siegels für Recyclingfreundlichkeit, das über Werbeeffekte ebenfalls eine Motivation darstellen soll, Geräte entsprechend zu gestalten.

Weil die Recyclingbranche in den letzten Jahrzehnten gezeigt hat, dass es für immer mehr Stoffgruppen immer bessere Verwertungsmethoden gibt, ist zu hoffen, dass sich die Erfolgsgeschichte von Papier- und PET-Recycling auch auf den Elektronikschrott ausweitet – mit technologischer und politischer Unterstützung.

9. Literaturverzeichnis

H FRIEGE: Zukünftige Abfallwirtschaft zwischen Siedlungshygiene und Gewinnung von Sekundärrohstoffen; in: A URBAN, G HALM (Hrsg.): *Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik der Universität Kassel*; Band 9; S.14f; Kassel University Press, Kassel 2009

K BRAND, A GÖSCHL, B HARTLEITNER, S KREIBE, C PÜRSCHEL, W VIEHÖVER: *Nachhaltigkeit und abfallpolitische Steuerung*; S.25; Analytica, Berlin 2002

http://www.gelbe-tonne-plus.de/index.php, aufgerufen am 11.9.2011

http://www.morgenpost.de/berlin/article1433494/Alba-erringt-Teilsieg-im-Berliner-Muellkrieg.html, aufgerufen am 11.9.2011

http://www.nokia.de/nokia/umwelt/we-create/materialien-und-inhaltsstoffe, aufgerufen am 13.5.2011

http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability, aufgerufen am 5.5.2011

http://www.patent-de.com/20081120/DE102006034692B4.html, aufgerufen am 8.5.2011

http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/chemie/GhanaEWaste_FINAL.pdf, aufgerufen am 5.5.2011

http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/chemie/Ghana_Science_note_FINAL.pdf, aufgerufen am 5.5.2011

http://www.oeko.de/oekodoc/1058/2010-106-de.pdf, aufgerufen am 5.5.2011

http://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2002/95/EG_(RoHS), aufgerufen am 5.5.2011

H MARTENS: *Recyclingtechnik;* S. 282; Spektrum Akademischer Verlag, Berlin 2010

G TAMM, C TRIBOWSKI: *RFID-Informatik im Fokus;* S. 2; Springer-Verlag, Berlin 2010

SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: *Umweltgutachten 2008*, S. 442

L ERDMANN ET AL: *Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung*; BMU 2009

http://www.fsc-deutschland.de/, aufgerufen am 06.09.2011