

Universität für Bodenkultur
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Innovative Verfahren zur Behandlung von Elektroaltgeräten

Masterarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von
DI (FH) Frank Michelberger
Stud. Kennz./Matr. Nr.: H 066 427/0440850

Wien, Oktober 2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist die Abschlussarbeit meines Masterstudiums Umwelt- und Bioressourcenmanagement an der Universität für Bodenkultur in Wien. Das Thema geht auf einen Vorschlag von Herrn ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Salhofer vom Institut für Abfallwirtschaft am Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt zurück, dem auch der Dank für die Betreuung dieser Arbeit gebührt. Natürlich sei auch allen anderen MitarbeiterInnen des Instituts für Abfallwirtschaft gedankt, die direkt oder indirekt die Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Die Arbeit wurde zwischen November 2011 und Januar 2013 durchgeführt. In diesem Thema sind mehrere Bereiche vereint, mit denen ich mich in den letzten Jahren beschäftigt habe: Abfall, Technologie und Innovationen. Vor allem letzteres ist ja per se ständig neu und spannend und somit auch abwechslungsreich und interessant. Wie sich gezeigt hat, war die Entscheidung für dieses Thema richtig, denn die Bearbeitung war wie das Thema: sehr spannend und abwechslungsreich.

Kurzfassung

Innerhalb der letzten Jahrzehnte kam es zu einem starken Anstieg der Menge an Elektrogeräten, die auf den Markt gebracht wurden. Da diese Geräte am Ende ihrer Lebenszeit entsorgt oder anderweitig behandelt werden müssen, nimmt das Thema der Behandlung dieser Geräte einen hohen Stellenwert ein. Mit dieser Arbeit soll ein systematischer Überblick über die in Entwicklung befindlichen Verfahren und Methoden zur Behandlung von Elektroaltgeräten gegeben werden. Basierend auf einer Literaturrecherche werden die einzelnen Technologien beschrieben und anschließend mittels Technologie-Portfolio-Analyse bewertet. Detaillierter wird das Innovationssystem der Sortiertechnologien betrachtet. Aus den Ergebnissen werden Schlüsse über den Ist-Zustand und die mögliche Weiterentwicklung von Innovationen zur Behandlung von Elektroaltgeräten gezogen und Empfehlungen für die Durchführung einer Technologie-Portfolio-Analyse in diesem Bereich gegeben.

Abstract

Within the last decades there has been a sharp increase in the quantity of electrical equipment that has been put on the market. Since these devices have to be disposed at the end of its life or otherwise treated the issue of the treatment of these devices plays an important role. With this work, a systematic overview of the procedures and methods under development for the treatment of WEEE will be given. Based on a literature review each technology will be described and then evaluated by means of technology portfolio analysis. Afterwards the innovation system of sorting technologies is considered in more detail. From the results conclusions about the current state and the possible development of innovations are drawn for the treatment of WEEE, and recommendations for the implementation of a technology portfolio analysis in this area will be given.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Allgemeine Grundlagen	2
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	2
2.1.1 WEEE- Richtlinie	2
2.1.2 RoHS-Richtlinie	4
2.2 Abgrenzungen.....	4
2.2.1 Begriffliche Abgrenzungen	4
2.2.2 Zeitliche und räumliche Abgrenzung	5
3. Behandlung von Elektroaltgeräten.....	6
3.1 Grundlagen	6
3.2 Mechanische Prozesse	7
3.2.1 Direkte Sortierverfahren.....	7
3.2.1.1 <i>Impact Catalysator (IC)-Verfahren</i>	7
3.2.1.2 <i>Magnetscheider</i>	10
3.2.1.3 <i>Wirbelstromscheider</i>	13
3.2.1.4 <i>Schredder-Sand Recycling</i>	15
3.2.2 Sensorgestützte Sortierverfahren	16
3.2.2.1 <i>Nahinfrarotspektroskopie</i>	16
3.2.2.2 <i>Farbsortierung</i>	20
3.2.2.3 <i>Röntgensortiertechnik</i>	23
3.2.2.4 <i>Induktionssortierung</i>	25
3.2.3 Multisensorsysteme.....	26
3.2.3.1 <i>VIS/NIR Spektroskopie</i>	26
3.2.3.2 <i>TiTech Kabelrückgewinnung</i>	28
3.2.3.3 <i>Projekt SpectroDense - Kunststoff-Rezyklate aus Elektroaltgeräten</i>	29
3.3 Metallurgie	30
3.3.1 Hydrometallurgie.....	30
3.3.2 Pyrometallurgie.....	32
3.3.3 Biometallurgie.....	38
4. Systemübergreifende Innovationen	39
4.1 Projekt SATURN	39
4.2 Projekt WEEE TRACE	41
4.3 Projekt E-AIMS.....	43
4.4 Projekt REWARD	45
4.5 Projekt Poly-Ressource.....	46
4.6 Projekt MoveRec.....	48
4.7 Projekt MORE	49
5. Bewertung der Verfahren	51
5.1 Technologieidentifikation	51
5.2 Technologieattraktivität.....	51

5.3	Ressourcenstärke	65
6.	Das Innovationssystem Sortiertechnologien	66
7.	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	69
7.1	Ergebnisse	69
7.2	Schlussfolgerungen	71
8.	Abbildungsverzeichnis	73
9.	Tabellenverzeichnis	75
10.	Abkürzungsverzeichnis	76
11.	Quellenverzeichnis.....	78

1. Einleitung

Elektronische Produkte und Geräte sind aus unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Sie werden in allen Lebensbereichen eingesetzt, von der Medizin über den Transport, von der Industrie bis in den privaten Lebensbereich hinein, und eine Innovation folgt dabei der nächsten. Insbesondere die Telekommunikationsbranche hat in den letzten Jahren ständig eine unüberschaubar hohe Stückzahl an Endgeräten auf den Markt gebracht, als Mobiltelefone in verschiedensten Variationen, als Smartphones oder Laptops.

Generell betrachtet wurden zum Beispiel im Jahr 2005 in der Europäischen Union 48 Millionen Laptops und Desktop Computer verkauft, dazu noch in etwa 32 Millionen Fernsehgeräte. In den USA wurden im Jahr 2006 mehr als 34 Millionen Fernsehgeräte verkauft und mehr als 139 Millionen Geräte wie Mobilfunktelefone oder Smartphones hergestellt. In China wurden im Jahr 2005 beinahe 15 Millionen Personal-Computer verkauft und mehr als 48 Millionen Fernsehgeräte, darüber hinaus noch beinahe 20 Millionen Kühlschränke (SCHLUEP et al., 2009). Da dies nur die Zahlen für das jeweils angegebene Jahr sind und die Verkaufszahlen fast überall steigen, ist auch in Zukunft mit großen Mengen an Elektrogeräten zu rechnen, die auf den Markt gebracht werden, in Gebrauch sind und irgendwann am Ende der Nutzungsdauer angelangt sind und entsorgt werden müssen.

Teilweise hat die Politik schon auf diese Problematik reagiert und einige Gesetze und Richtlinien für den Umgang mit Elektroaltgeräten erlassen, wie zum Beispiel auf EU-Ebene die WEEE-Richtlinie oder die RoHS-Richtlinie, die im anschließenden Kapitel näher beschrieben werden. Unabhängig davon sind aber schon seit einigen Jahren verschiedene Verfahren zur Behandlung von Elektroaltgeräten im Einsatz, die ständig weiterentwickelt werden, angefangen von der Zerkleinerung über die Sortierung bis hin zur eigentlichen Verwertung, beispielsweise durch metallurgische Prozesse. Diese sollen mit der vorliegenden Arbeit systematisiert erfasst, beschrieben und bewertet werden. Dabei stehen Innovationen im Vordergrund die noch in Entwicklung sind, aber auch solche, die schon am Markt sind, sollen mit erfasst werden.

2. Allgemeine Grundlagen

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

2.1.1 WEEE- Richtlinie

Im Folgenden sollen, nach einem kurzen Überblick über die allgemeinen Ziele dieser Richtlinie, die wesentlichen Passagen dargestellt werden, die im Zusammenhang mit Innovationen bei der Behandlung von Elektroaltgeräten relevant sind. Dies erscheint insofern notwendig, da im Zuge einer Forschungsarbeit befragte Unternehmen aus der Branche der Meinung waren, dass ein Markt für Sortiersysteme überhaupt erst durch rechtliche Rahmensetzungen entstanden ist. Die weitere Entwicklung dieses Marktes, insbesondere die technologische Entwicklung, ist auch zukünftig von politischen Entscheidungen abhängig. Diese können sowohl positive als auch negative Entwicklungen auslösen. Positiv wäre zum Beispiel, wenn eine neue Regulierungsmaßnahme eingeführt wird, die eine technologische Weiterentwicklung erfordert. Negativ wäre, wenn ein bestimmtes Entsorgungsverfahren bevorzugt würde, wie zum Beispiel die Müllverbrennung, und somit die Nachfrage nach Sortiersystemen negativ beeinflusst (HENZELMANN et al., 2007).

Mit 27. Januar 2003 wurde die Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte veröffentlicht. Vorrangiges Ziel dieser Richtlinie war die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikaltgeräten, die Wiederverwendung, das Recycling von Wertstoffen und andere Formen der Verwertung. Die Mitgliedstaaten wurden verpflichtet, Maßnahmen zu ergreifen, um die Entsorgung dieser Geräte im Siedlungsabfall möglichst zu vermeiden. Im Besonderen sollten ab August 2005 Systeme eingerichtet sein, bei denen es möglich ist, die Altgeräte kostenlos zurückzugeben. Bis zum 31. Dezember 2006 sollte somit eine Quote von durchschnittlich vier Kilogramm getrennt gesammelten Elektro- und Elektronikaltgeräten aus privaten Haushalten pro Einwohner pro Jahr erreicht werden. In Österreich wurde diese Zielvorgabe mit 7,65 kg / Einwohner im Jahr 2006 überschritten und konnte auch in den folgenden Jahren stets übertroffen werden (EKA, 2011).

Seit 4. Juli 2012 ist die Neufassung dieser Richtlinie in Kraft, nämlich die Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronikaltgeräte. Diese verfolgt grundsätzlich das gleiche Ziel, wurde aber in einigen Punkten überarbeitet. So gibt es zum Beispiel anstelle der zehn Gerätekategorien nach einer Übergangszeit von sechs Jahren einen offenen Anwendungsbereich mit sechs Gerätekategorien, in die dann aber alle Elektro- und Elektronikaltgeräte fallen. Zukünftig sind auch anstelle der Hersteller die Mitgliedstaaten für die Einhaltung der Sammelquoten zuständig und außerdem werden die Sammelquoten in den kommenden Jahren schrittweise angehoben werden (WKÖ, 2012).

Bezüglich der Behandlung ist in Artikel 8 festgehalten, dass die Mitgliedstaaten sicherzustellen haben, dass die besten verfügbaren Techniken für die Verwertung eingesetzt werden und diese den Anforderungen, die in den Anhängen VII und VIII definiert sind, entsprechen müssen.

Anhang VII definiert Stoffe, Gemische und Bauteile, die aus Elektro- und Elektronikgeräten entfernt werden müssen, wie zum Beispiel PCB-haltige Kondensatoren, Batterien, quecksilberhaltige Bauteile, Leiterplatten und Tonerkartuschen. Weiter wird für bestimmte Bauteile vorgegeben, wie diese zu behandeln sind.

In Anhang VIII werden die technischen Anforderungen für Standorte beschrieben, einerseits für Standorte für die Lagerung, zum anderen für Standorte für die Behandlung.

Außerdem ist in Artikel 8 festgehalten, dass die Kommission die europäische Normungsorganisationen beauftragt bis Februar 2013 Normen für die Behandlung (inklusive Verwertung, Recycling und Vorbereitung zur Wiederverwendung) von Elektro- und Elektronikgeräten auszuarbeiten. Dabei wird darauf hingewiesen, dass diese dem Stand der Technik entsprechen müssen.

Im Artikel 11 wird in Absatz 5 festgehalten, dass die Mitgliedstaaten die Entwicklung neuer Verwertungs-, Recycling- und Behandlungstechnologien fördern. Nähere Angaben, wie diese gefördert werden sollen, werden nicht getätigt.

Auch im einleitenden Text der Richtlinie, in den Erläuterungen für die Gründe dieser Richtlinie, wird unter Punkt 17 festgehalten, dass die „besten verfügbaren“ Behandlungs-, Verwertungs- und Recyclingtechniken eingesetzt werden. Für eine mögliche Definition dieser wird hierbei auf die Richtlinie 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung verwiesen. Dort werden die Begriffe folgendermaßen definiert:

- „beste“: Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt sind.
- „verfügbar“: Techniken, die in einem Maßstab entwickelt sind, der unter Berücksichtigung des Kosten- Nutzen-Verhältnisses die Anwendung in dem betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch unter vertretbaren Verhältnissen ermöglicht, ganz gleich, ob diese Techniken innerhalb des betreffenden Mitgliedstaats verwendet oder hergestellt werden, sofern sie zu vertretbaren Bedingungen für den Betreiber zugänglich sind (IVU-RICHTLINE, 2008).

Konkrete Hinweise auf Innovationen beziehungsweise Definitionen für diesen Bereich finden sich nicht.

2.1.2 RoHS-Richtlinie

Diese am 3. Januar 2013 in Kraft getretene EG-Richtlinie 2011/65/EU (RoHS 2)¹ soll die Verwendung gefährlicher Stoffe bei der Herstellung von Elektro- und Elektronikgeräten beschränken. Im Speziellen ist von den Mitgliedstaaten aufgrund dieser Richtlinie sicherzustellen, dass in Elektro- und Elektronikgeräten folgende Stoffe nicht mehr enthalten sind:

- Blei
- Quecksilber
- Cadmium
- Sechswertiges Chrom
- Polybromiertes Biphenyl (PBB)
- Polybromierter Diphenylether (PBDE)

Dabei wird auch geregelt, welche Produkte davon ausgenommen sind und wie diese Ausnahmen zu evaluieren sind. Um Anpassungen an den technischen Fortschritt zulassen zu können ist auch die Möglichkeit eingeräumt worden, Konzentrationshöchstwerte für die Stoffe anzugeben (TESAR und ÖHLINGER, 2009).

2.2 Abgrenzungen

2.2.1 Begriffliche Abgrenzungen

Innovation:

Klassischerweise wird bei der Definition des Begriffes Innovation auf den österreichischen Ökonom Joseph Schumpeter Bezug genommen, der Innovation als Prozess definiert hat, durch den neue Produkte und neue Technologien in das ökonomische System eingeführt werden (SCHUMPETER, 1947). Seit dieser Zeit hat sich das Verständnis zu diesem Begriff immer wieder leicht verändert. So wird mittlerweile der Begriff Innovation nicht nur auf Produkte und Technologien begrenzt, sondern auch auf Prozesse oder Systeme erweitert. Neuere Definitionen sprechen daher von allen planvollen und zielgerichteten Neuerungen, also Änderungen und Ausweitungen des Bestehenden, die Neues hervorbringen und verbreiten können (NELSON, 1968). Dies führt sogar so weit, dass mittlerweile auch schon von Politik- oder Verwaltungsinnovationen gesprochen wird. Diese fast schon inflationäre Verwendung führt allerdings dazu, dass der Begriff manchmal auch

¹ Damit wurde die EG-Richtlinie 2002/95/EG (RoHS 1) abgelöst

falsch verwendet wird und so wird zum Beispiel von Innovation gesprochen, wenn Invention, also eine Erfindung, gemeint ist.

Hier soll der Begriff Innovation in dem Sinne verwendet werden, dass sowohl die Einführung neuer Technologien als auch Produkte beziehungsweise auch Prozess- und Systeminnovationen (also auch Verfahren) untersucht und dargestellt werden. Reine Erfindungen, also Inventionen, die noch in der Entwicklungsphase sind, sind nicht im Fokus dieser Arbeit. Hier sollen innovative Verfahren identifiziert werden, die kurz vor der Einführung stehen, die im Moment in der Pilot- beziehungsweise Demonstrationsphase sind oder die schon als neue Produkte dem Markt zur Verfügung stehen.

Behandlung:

Laut dem österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) beinhaltet der Begriff (Abfall)Behandlung sowohl die Verwertung als auch die Beseitigung von Abfall. Das heißt, unter diesen Begriff fallen sowohl die thermische als auch die mechanisch-biologische Abfallbehandlung, sowie die Deponierung und das Recycling. In dieser Arbeit soll der Begriff Behandlung auf die Bereiche Sortierung und Trennung eingeschränkt werden. Das heißt, der Fokus liegt auf innovativen Sortier- und Trenntechnologien und den dazugehörigen Prozessen.

Elektroaltgeräte:

In dieser Arbeit gilt die in der WEEE-Richtlinie verwendete Definition für Elektro- und Elektronikgeräte, nämlich „... Geräte, die zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb elektrische Ströme oder elektromagnetische Felder benötigen, und Geräte zur Erzeugung, Übertragung und Messung solcher Ströme und Felder (...) und für den Betrieb mit Wechselstrom von höchstens 1 000 Volt beziehungsweise Gleichstrom von höchstens 1 500 Volt ausgelegt sind.“ Und die daran anschließende Definition für WEEE, nämlich der Verweis auf die Richtlinie 75/442/EEC, in der der Begriff Abfall definiert wurde mit der Ergänzung, dass jegliches Zubehör und alle Komponenten zum Zeitpunkt der Entsorgung ebenfalls zu den Elektroaltgeräten zugehörig sind (WEEE-RICHTLINIE, 2003).

2.2.2 Zeitliche und räumliche Abgrenzung

Diese Arbeit wurde im Zeitraum von November 2011 bis Januar 2013 durchgeführt.

Die Recherche wurde zum größten Teil im Internet durchgeführt, deshalb gibt es keine räumliche Einschränkung. Die Aussagen gelten aber zumindest für den europäischen Raum, auf den sich die Recherche schwerpunktmäßig konzentriert hat.

Vor-Ort-Besuche waren nicht vorgesehen und wurden auch nicht durchgeführt.

3. Behandlung von Elektroaltgeräten

3.1 Grundlagen

Wie schon erwähnt, umfasst der Begriff der Behandlung die Verwertung und die Beseitigung von Abfall. Eine genauere Betrachtung der gesamten Prozesskette zeigt, dass diese auch die Sammlung der Geräte beinhaltet. Eine grobe schematische Übersicht dieser Prozesskette zeigt die folgende Abbildung, wobei die Behandlung im Detail unterschiedlich sein kann, je nachdem welche Ausgangsmaterialien vorliegen (z.B. Kühlschrank, Mobiltelefon, Kunststoffe, Metalle,...).

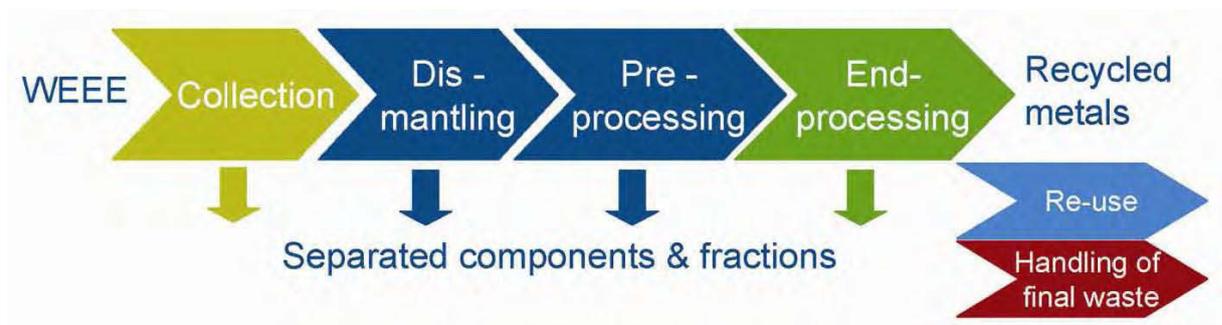


Abbildung 1: Übersicht zur Behandlung von Elektroaltgeräten (SCHLUEP et al., 2009)

Die hier skizzierte Prozesskette beinhaltet neben der Sammlung auch die Trennung in Komponenten und Fraktionen, die wiederum in Dismantling und Pre-Processing und allenfalls anschließend in End-Processing unterteilt wird.

Mit Demontage (Dismantling) wird das Auseinandernehmen eines Produkts oder eines Bauteils bezeichnet. In der Abfallwirtschaft sollen damit vier Ziele erreicht werden: Die Rückgewinnung von Bauteilen, die wiederverwendet werden können, das Abtrennen von Schadstoffen, die Rückgewinnung von Werkstoffen und die Reduzierung des Restmülls (MARTENS, 2011).

Zur Erleichterung der Demontage von Elektroaltgeräten müssen die Hersteller laut WEEE die verschiedenen Bauteile und Werkstoffe angeben, die in dem Produkt enthalten sind und auch, ob gefährliche Stoffe enthalten sind, und wenn ja, an welcher Stelle diese sich befinden.

Zum Pre-Processing zählen vor allem die Verfahren, mit denen das Ausgangsmaterial auf eine kleinere Korngröße gebracht wird, also die Zerkleinerung. Je nach Ausgangsmaterial und je nach Verwendungszweck des Endmaterials können dafür verschiedene Verfahren zur Anwendung kommen. Das Spektrum reicht von Backenbrecher oder Prallbrecher, die für die Grobzerkleinerung von Bauschutt zum Einsatz kommen, bis hin zu Schneidmühlen oder

Hammermühlen, die für die Feinzerkleinerung von Thermoplasten eingesetzt werden.

Allgemein lassen sich die Verfahren einteilen in:

- Zerkleinerer mit schneidender Beanspruchung, wie zum Beispiel Rotorscheren, Einwellenzerkleinerer, Schneidmühlen
- Zerkleinerer mit reißender Beanspruchung, wie zum Beispiel Kammwalzenzerkleinerer, Schneckenmühlen
- Zerkleinerer mit Schlag- und Prallbeanspruchung, wie zum Beispiel Hammermühlen, Schredder, Prallmühlen, Prallbrecher (KRANERT und CORD-LANDWEHR, 2010)

Unter End-Processing werden in der obigen Definition die metallurgischen Prozesse verstanden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Bereiche mechanische Prozesse und metallurgische Prozesse betrachtet und Innovationen, die dort stattfinden aufgezeigt.

3.2 Mechanische Prozesse

3.2.1 Direkte Sortierverfahren

3.2.1.1 Impact Catalysator (IC)-Verfahren

Das IC-Verfahren wird zur Behandlung von Kühlgeräten eingesetzt und beruht grundsätzlich auf dem Prinzip des Schredderns, also der mechanischen Zerkleinerung des Materials mit Schlag- und Prallbeanspruchung. Im Speziellen wird hier die sogenannte Querstromzerspannung angewendet. Das wesentliche Merkmal dieses Verfahrens ist, dass kein Schneidwerkzeug zur Zerkleinerung verwendet wird. Hier wird in einem geschlossenen, zylindrischen Behälter das Füllgut in Rotation versetzt. Dazu wird meistens eine Stahlkette verwendet. Diese ist knapp über dem Boden des Behälters, in der Mitte fixiert angebracht und wird angetrieben. Durch die Fliehkraft wird die Kette gestreckt und stabil und bringt dadurch das Füllgut in Rotation. Dabei prallen die Geräte aufeinander und zerkleinern sich gegenseitig (MARTENS, 2011). Die Hersteller gehen davon aus, dass in etwa 30% des Füllguts mit der Kette in Berührung kommt. Dies wird oft als Vorteil des Systems der Querstromzerspannung gegenüber anderen Systemen gesehen, nämlich dass somit ein geringer Verschleiß des Werkzeugs, also der Kette, erreicht werden kann, wobei im Rahmen der Recherche weder Nachweise für oder gegen diese Angaben gefunden werden konnten. Generell soll mit dem Schreddern eine selektive Zerkleinerung des eingesetzten Materials erreicht werden. Folgende Ziele sollen erreicht werden (BHS, 2012):

- Auflösen von Materialverbänden
- Zerkleinerung sprödharter Stoffe
- Freilegen von Metallen
- Vereinzeln und Entzerren von verhakten Materialien
- Reduzierung der Stückgröße

Im Anschluss daran erfolgt dann die Trennung in Fraktionen, vorwiegend in Eisen, Nichteisenmetalle und Kunststoffe beziehungsweise die Aussortierung von schadstoffbehafteten Bauteilen wie zum Beispiel Batterien, Kondensatoren und Leiterplatten.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch das Austragsgut nach dem Schreddern (Abbildung 2) und nach der Trennung (Abbildung 3 bis 5).



Abbildung 2: Austragsgut nach dem Schreddern (BHS, 2012)



Abbildung 3: Austragsgut nach dem Schreddern – Eisen (BHS, 2012)



Abbildung 4: Austragsgut nach dem Schreddern – Nichteisenmetall (BHS, 2012)



Abbildung 5: Austragsgut nach dem Schreddern – Kunststoffe (BHS, 2012)

Grundsätzlich erfolgt die Behandlung von Kühlgeräten in mehreren Schritten, die in einzelnen Anlagen variieren können, aber prinzipiell nach dem im folgenden beschriebenen Muster ablaufen.

In dem ersten Schritt erfolgt die manuelle Demontage, bei der eventuelle Restinhalte entfernt werden und leicht entfernbare Teile demontiert werden, wie zum Beispiel Glas oder Kabel. Diese Teile können dann einer separaten Verarbeitung zugeführt werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Absaugung des Kältemittels und des Kompressoröls, welche wiederum separat behandelt werden können. Anschließend erfolgt die Zerkleinerung des Kühlgeräts. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Zerkleinerung von Kühlgeräten, bei denen FCKW/H-FKW/H-FCKW im Isolierschaum enthalten ist, in gekapselten Schredder-Anlagen mit direkter Auftrennung in einzelne Wertstofffraktionen und Erfassung der Prozessluft stattfindet. Zumeist erfolgt eine Trennung in eine Nichteisen-/Kunststofffraktion, eine

Eisenfraktion und eine Isolierschaumfraktion. Die Fraktionen, in denen noch FCKW/H-FKW/H-FCKW enthalten ist (Nichteisen-/Kunststoff und Isolierschaum), müssen anschließend nochmals einer Behandlung unterzogen werden, um die Anteile des FCKW/H-FKW/H-FCKW auszutreiben (TESAR und ÖHLINGER, 2009). Dazu werden die Fraktionen mit Stickstoff gespült. Mittels Kryokondensation (Abkühlung bis zu -100°C) kann das FCKW/H-FKW/H-FCKW dann verflüssigt und somit zurückgewonnen werden. Eine andere Möglichkeit zur Rückgewinnung besteht in der Filtration durch Aktivkohle (MARTENS, 2011).

Beim IC-Verfahren entfällt der letzte Schritt, also die Zugabe von Stickstoff, kombiniert mit Kryokondensation oder Aktivkohlefiltration. Bei diesem Verfahren wird die kühl- und treibmittelbeladene Abluft, die im Prozess entsteht, abgesaugt und thermisch-katalytisch behandelt. Das bedeutet, dass die Schadstoffe in ungefährliche Bestandteile wie salzhaltiges Abwasser und Kohlendioxid (CO_2) als Abgas umgewandelt werden.

Der Hersteller verspricht durch dieses Verfahren folgende Vorteile gegenüber den bisherigen Verfahren (BHS, 2010):

- Ökologisch einwandfreie Gasaufbereitung durch thermisch-katalytische Umwandlung aller Kühl- und Treibmittel in salzhaltiges Abwasser und CO_2 direkt innerhalb der Anlage
- Geringere Betriebskosten gegenüber den konventionellen Verfahren mit Aktivkohle und Kryokondensation, da zum Beispiel kein teurer Flüssigstickstoff erforderlich ist
- Keine kostenintensive Abfüllung, Transport und Entsorgung von kondensierten Kühl- und Treibmitteln

Das IC-Verfahren ist erprobt und seit ungefähr drei Jahren am Markt erhältlich.

3.2.1.2 *Magnetscheider*

Bei der Aufbereitung folgt nach dem Schreddern meist das Abtrennen von Eisen und eisenhaltigen Metallen. Dazu wird der magnetische Effekt genutzt. Das zerkleinerte Austragsgut läuft durch ein magnetisches Feld und alle magnetisierbaren Stoffe werden von dem Feld angezogen und somit dem Abfallstrom entzogen. Dazu gibt es mehrere Verfahren, wie zum Beispiel mittels Magnettrommel oder mittels eines Überbandmagnetscheiders.

Das Magnetabscheidungsverfahren und das Wirbelstromverfahren (siehe Kapitel 3.2.1.3) sind in diesem Kontext die einzigen Verfahren, in denen die Detektion und die Separation des Austragsguts in einem Schritt erfolgt. Bei allen anderen Verfahren sind die Detektion und die Separation jeweils ein eigener Arbeitsschritt.

- **Magnettrommel:** Hier hat sich die sogenannte überlaufende Arbeitsweise durchgesetzt. Dabei wird der Abfallstrom über den Trommelmantel geführt, der um einen Permanentmagneten rotiert. Dieser Permanentmagnet erzeugt ein Magnetfeld, das in Abbildung 6 schraffiert dargestellt ist. Die metallischen Teile des Abfallstroms bleiben nun an dem Trommelmagneten hängen, solange bis diese durch die Rotation in den nichtmagnetischen Bereich kommen. Hier fallen sie ab und werden somit vom Abfallstrom getrennt (WAGNERMAGNETE, 2012).

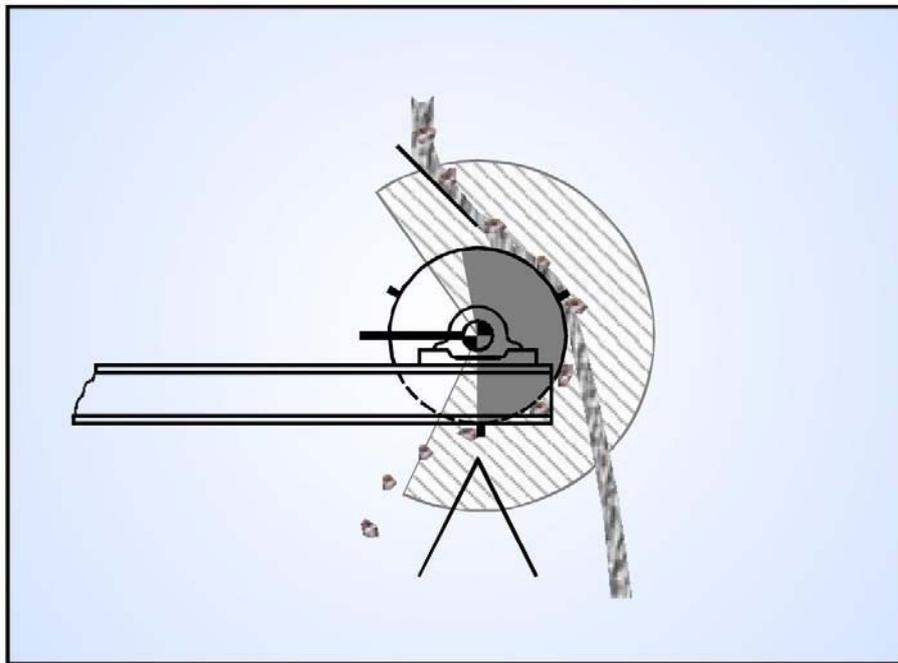


Abbildung 6: Magnettrommel (WAGNERMAGNETE, 2012)

- **Überbandmagnetscheider:** Der Magnet, meist ein Permanentmagnet, befindet sich über dem Abfallstrom. Das Magnetfeld zieht die Eisenteile an und durch das Laufband, das um den Magneten herumläuft, wird das angezogene Material weiter transportiert, um dann separat gesammelt zu werden. In Abbildung 7 ist dieser Vorgang dargestellt. Die schwarzen Würfel symbolisieren dabei Eisen- und eisenhaltiges Material. Meist ist in dem Überbandmagnetscheider noch eine Möglichkeit zur Selbstreinigung des Laufbands installiert. Dies ist besonders dann notwendig, wenn der Eisenanteil im Abfallstrom sehr hoch ist. Wenn der Eisenanteil eher gering ist, kann die Anlage auch ohne Selbstreinigung ausgelegt werden. Dann ist aber in bestimmten zeitlichen Abständen eine manuelle Reinigung vorzusehen.



Abbildung 7: Überbandmagnetscheider (STEINERT, 2012)

Diese Methode ist bereits Stand der Technik und es bestehen ausreichend Erfahrungen mit der verwendeten Technologie. Trotzdem finden sich auch hier Weiterentwicklungen, wenn auch eher inkrementelle.

So ist zum Beispiel bei zur Erzeugung des Magnetfelds eine elektrische Leistung notwendig. Die Entwicklung geht nun dahin, die Aufnahme der elektrischen Leistung zu reduzieren, hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen, aber auch im Zuge der allgemeinen Debatte über die Energieeffizienz. Ein weiteres Thema bei elektrisch erzeugten Magnetfeldern ist die Wärme, die bei der Leistungsaufnahme entsteht. Standardmäßig werden Konstruktionen verwendet, in denen die Spule, die das Magnetfeld erzeugt, in einer Ölfüllung untergebracht ist. Dieses Öl führt dann die Wärme ab. Ein neuer Ansatz ist, luftgekühlte Spulen zu verwenden, die mittlerweile die gleichen Leistungswerte erreichen. Seit einigen Jahren bieten die Hersteller auch Magnetsysteme mit Neodym an. Magnete mit diesem Werkstoff zeigen eine erheblich höhere magnetische Energiedichte. Somit sind Gewichts- und Platzersparnisse von bis zu 35% möglich (STARMAG, 2012). Neodym zählt allerdings zu den Metallen der seltenen Erden und ist daher aktuell Gegenstand der wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion. Einerseits ist das wirtschaftlich abbaubare Vorkommen stark begrenzt und andererseits verursacht der Abbau starke Umweltprobleme (CHU, 2011). Weiters wird Neodym auch zu den Rohstoffen gezählt die für Zukunftstechnologien benötigt werden, wie zum Beispiel für die Lasertechnik, oder für Permanentmagneten. Der zukünftige Bedarf für diesen Rohstoff im Jahr 2030 wird auf 27.900 Tonnen geschätzt. Im Jahr 2006 war der Bedarf bei 4.000 Tonnen, d.h. es wird eine Steigerung um das knapp siebenfache erwartet (ANGERER et al., 2009). Es ist davon auszugehen, dass auch die Hersteller der Magnete zukünftig versuchen werden, Neodym durch andere Werkstoffe oder Technologien zu ersetzen, da die Verknappung des Rohstoffs zu einer starken Preissteigerung führen kann.

Das Gesamtsystem wird dahingehend weiterentwickelt, dass Magnetscheider mit Metalldetektoren gekoppelt werden. Diese erfassen die Menge des Metalls im Abfallstrom beziehungsweise ob überhaupt Metall im Abfallstrom vorhanden ist. Somit kann der Magnet im Bedarfsfall aktiviert werden. Ziel ist wieder die Optimierung des Energiebedarfs (STEINERT, 2012).

Eine ständige Forderung ist auch, die Durchsatzleistung zu steigern, um mehr Material in der gleichen Zeit sortieren zu können. Die Hersteller bieten daher nicht nur Standardmodelle an, sondern auch speziell angepasste Lösungen. Das heißt, wenn die Randbedingungen der Anlage bekannt sind und konstant oder nahezu unverändert bleiben (zum Beispiel die Zusammensetzung des Abfallstroms), werden für diesen Anwendungsfall individuelle Lösungen konstruiert. Dabei werden Punkte berücksichtigt wie: Anordnung des Magnetfelds (mittig oder längs), Art des Magneten (permanent oder elektrisch), Leistung des Magneten bis hin zur Arbeitsbreite.

3.2.1.3 Wirbelstromscheider

Nach der Aussortierung der eisenhaltigen Metalle erfolgt zumeist die Aussortierung der Nichteisenmetalle (NE-Metalle). Dazu wird das Prinzip des Wirbelstromverfahrens eingesetzt.

Als Wirbelstrom wird ein Strom bezeichnet, der in einem Leiter oder in einem Magnetfeld induziert wird. Die daraus resultierenden Kraftwirkungen der entstehenden Magnetfelder (Anziehung oder Abstoßung) lassen sich je nach Anwendungsfall nutzen. Eine Anwendung ist zum Beispiel die Wirbelstrombremse bei Schienenfahrzeugen. Hierbei wird die anziehende, also bremsende Kraft zur Reduzierung der Geschwindigkeit genutzt. Der umgekehrte Effekt, also die Abstoßung, wird bei der Aussortierung von NE-Metallen genutzt. Ein rotierender Permanentmagnet erzeugt ein hochfrequentes, magnetisches Wechselfeld. Durch dieses werden in den NE-Metallen Wirbelströme induziert und dadurch ein Magnetfeld aufgebaut. Dieses Magnetfeld wirkt dem äußeren Magnetfeld entgegen, das heißt, die beiden Felder stoßen sich gegenseitig ab. Dadurch werden die NE-Metalle von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt und somit von dem restlichen Abfallstrom getrennt. Abbildung 8 zeigt diesen Effekt. Das rotierende Magnetfeld befindet sich in der Walze und die roten Dreiecke symbolisieren die NE-Metalle.

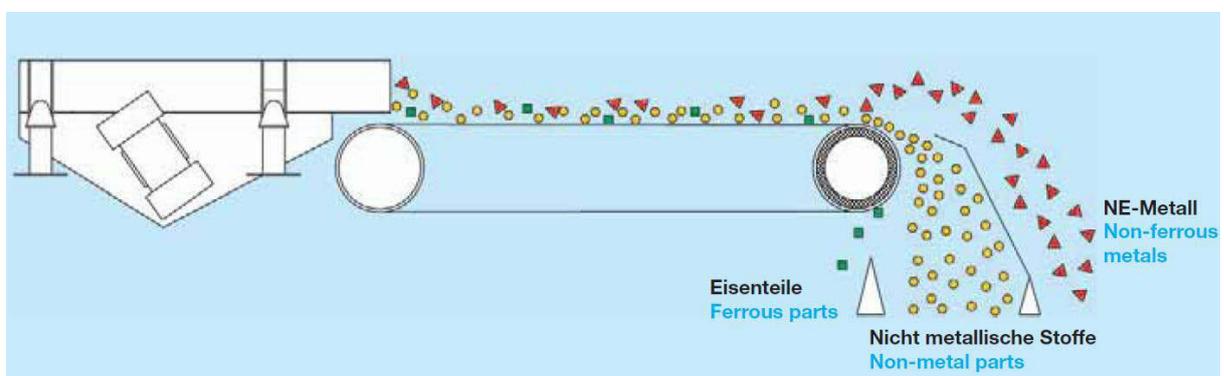


Abbildung 8: Wirbelstromscheider (IFE-Bulk, 2012)

Eine Weiterentwicklung der letzten Zeit war, dass der Magnet exzentrisch in der Walze angeordnet wurde. Damit konnte die Kraftereinwirkung auf die NE-Metalle deutlich gesteigert werden und eine bessere Abwurfparabel erzeugt werden (siehe Abbildung 9), wodurch eine deutliche Qualitätsverbesserung bei der Sortierung erreicht werden konnte.

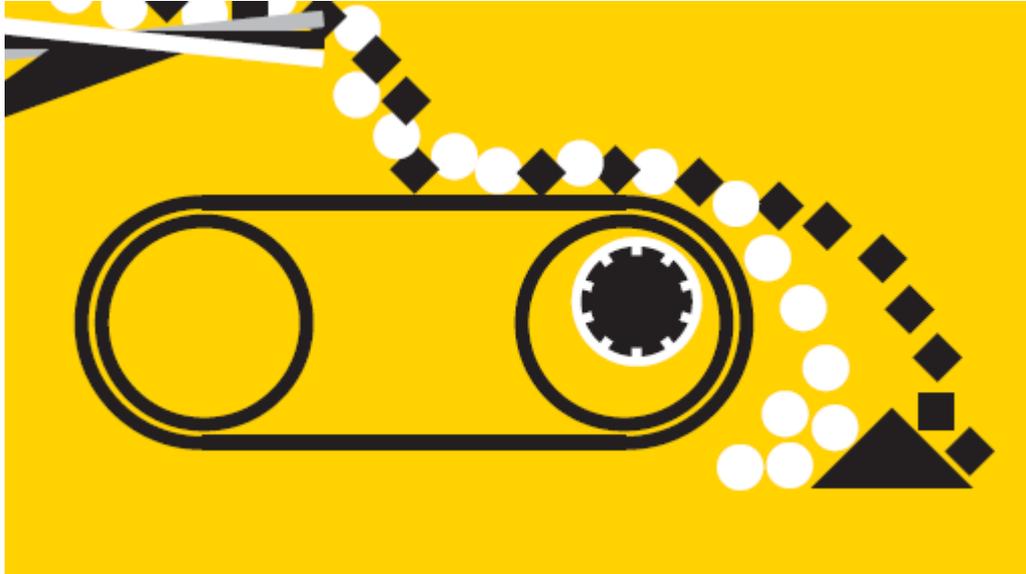


Abbildung 9: Exzentrisch angeordneter Magnet (STEINERT, 2012)

Auch bei diesem Verfahren wird eine stetige Erhöhung der Durchsatzleistung und eine Verbesserung der Qualität angestrebt. Mindestens ein Hersteller ist derzeit in der Lage, eine Arbeitsbreite von 2,5 Metern anzubieten, was vor kurzem noch nicht Stand der Technik war. Dies bringt für den Betreiber enorme wirtschaftliche Vorteile, da bisher zwei parallele Anlagen notwendig waren, um dieselbe Durchsatzleistung zu erreichen (STEINERT, 2007).

Ein weiteres Innovationsgebiet ist die Verbesserung der Instandhaltung und Wartung der Anlagen, was einerseits von den Betreibern gefordert wird, und andererseits von den Herstellern auch eigenständig weiterentwickelt wird, um konkurrenzfähig zu bleiben. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz einer verschleißfreien elektrischen Bremsung (TIAF, 2012).

Auch bei dem Wirbelstromscheider werden Magneten auf Basis von Neodym eingesetzt. Somit kann auch hier davon ausgegangen werden, dass künftig andere Werkstoffe oder Technologien eingesetzt werden.

3.2.1.4 Schredder-Sand Recycling

Ein neuartiger Ansatz zur Steigerung der Ressourceneffizienz beim Schreddern ist die Rückgewinnung von Stoffen aus dem Schredder-Sand. Dieser enthält neben Eisen und Buntmetallen auch organische und mineralische Bestandteile. In Deutschland fallen pro Jahr in etwa 450.000 Tonnen Schredderrückstände an, die nicht recycelt werden. Bisher wurde der Rückstand, der beim Schreddern anfällt, nicht stofflich genutzt, sondern als Versatz unter Tage verbracht. Geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen bei der Verbringung unter Tage, aber auch die steigenden Rohstoffpreise und die stetig steigenden Mengen an Schredderrückständen sorgen für veränderte Randbedingungen und somit dafür, dass eine Verwertung der Schredder-Sande ökonomisch attraktiv wird. Die Partner TU Clausthal, Recylex GmbH, SiCon GmbH und VW AG starteten dazu das Projekt „Shredder-Sand: Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden“, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird.

Beim Zerkleinern entsteht neben den gewollten Fraktionen der Eisen- und Nichteisenmetalle, die mittels anschließender Magnet- und Wirbelstromscheider gewonnen werden, auch noch eine sogenannte Reststofffraktion. Diese kann in eine Schredderleichtfraktion und eine Schredderschwerfraktion unterschieden werden. Zur Aufbereitung dieser Rückstände existieren bereits unterschiedliche Verfahren. In dem hier vorliegenden Projekt wird das VW-SiCON-Verfahren weiterentwickelt, das eines dieser Verfahren zur Aufbereitung der Schredder-Rückstände ist. Bei diesem Verfahren werden fünf Fraktionen gewonnen: Schredderflusen, Schreddergranulat, eine FE-Fraktion, eine NE-Fraktion und Schredder-Sand. Bis auf den Schredder-Sand existieren für alle Fraktionen weitere Verwertungswege. Da diese, wie schon erwähnt, nicht mehr als Versatzmaterial im Bergeversatz oder als Deponieeinsatzstoff eingesetzt werden dürfen, wurden neue Wege gesucht, um diese Sande zu verwerten.

Dazu wurde ein Aufbereitungsverfahren entwickelt, das in mehreren Schritten (nass-mechanisch und nass-chemisch) eine Rückgewinnung von mindestens drei metallurgisch interessanten Fraktionen (Eisen, Zink, Kupfer) sowie einer Baustofffraktion ermöglicht. Dabei werden folgende Prozessschritte durchlaufen: Abtrennung durch Flotation und Nasstrenntisch, Magnetscheidestufe, Mahlstufe mit anschließender Siebung, Abtrennung der Metallfracht mittels Laugung. Die Entwickler gehen davon aus, dass mit diesem Verfahren im Schnitt 65% der Gesamtmenge des Schredder-Sandes verwertet werden kann (DUWE und GOLDMANN, 2012).

3.2.2 Sensorgestützte Sortierverfahren

Die im Folgenden vorgestellten Verfahren Nahinfrarotspektroskopie, Farbsortierung, Röntgensortierung und Induktionssortierung basieren im Wesentlichen auf demselben Prinzip. Der Abfallstrom wird auf einem Förderband dem Scanner zugeführt. Der Scanner detektiert das spezifische Gut, während das Förderband weiterläuft. Eine Auswerteeinheit verarbeitet die Daten und steuert Druckluftdüsen an. Durch einen kurzen Luftstoß werden dann die zuvor detektierten Teile angestoßen und umgelenkt, so dass diese aus dem Abfallstrom aussortiert werden. In Abbildung 10 ist dieser Prozess skizziert dargestellt. Mit der Entwicklung und Einführung der sensorgestützten Sortierung in die Abfallwirtschaft ist die Grundlage für die Herstellung von Sekundärrohstoffen mit hoher Qualität geschaffen, bei gleichzeitiger Reduktion von Personalkosten (KRANERT und CORD-LANDWEHR, 2010).

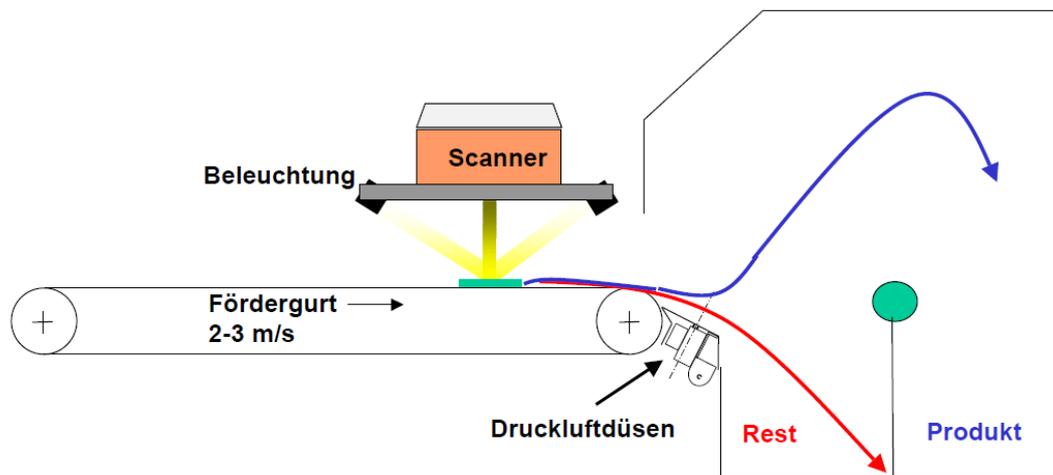


Abbildung 10: Sensorgestützte Sortierung allgemein (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

3.2.2.1 Nahinfrarotspektroskopie

Zur Detektion und Aussortierung von Kunststoffen hat sich die Nahinfrarotspektroskopie (NIR) schon seit einigen Jahren bewährt (KRANERT und CORD-LANDWEHR, 2010). Wie im Folgenden auch noch beschrieben wird, können allerdings nicht alle Arten von Kunststoffen zuverlässig erkannt werden. Bei der Aussortierung von Kunststoffverpackungen jedoch, insbesondere von PVC, ist die Erkennung mittels NIR Stand der Technik.

Der Infrarotbereich folgt im elektromagnetischen Spektrum direkt dem sichtbaren Bereich und beginnt ab ungefähr 800 nm. Der Bereich des Nahen Infrarot bewegt sich dabei zwischen 800 nm und 2500 nm (Abbildung 11).

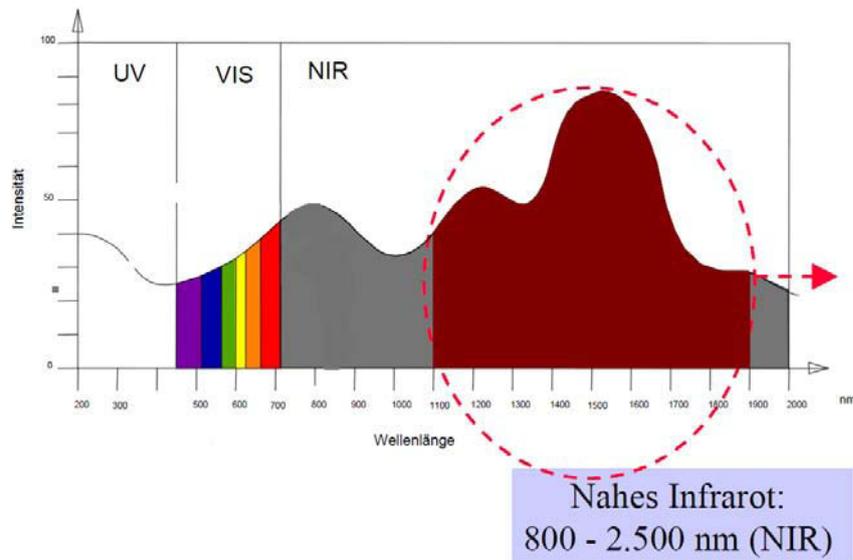


Abbildung 11: NIR im elektromagnetischen Spektrum (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

Jedes Material verfügt auf der molekularen Ebene über charakteristische Eigenschaften, die im Nahen Infrarot erkannt werden können und lässt sich anhand dieser Eigenschaften eindeutig identifizieren. In Abbildung 12 ist dazu exemplarisch die charakteristische Kurve des Spektrums von drei verschiedenen Kunststoffen dargestellt: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC).

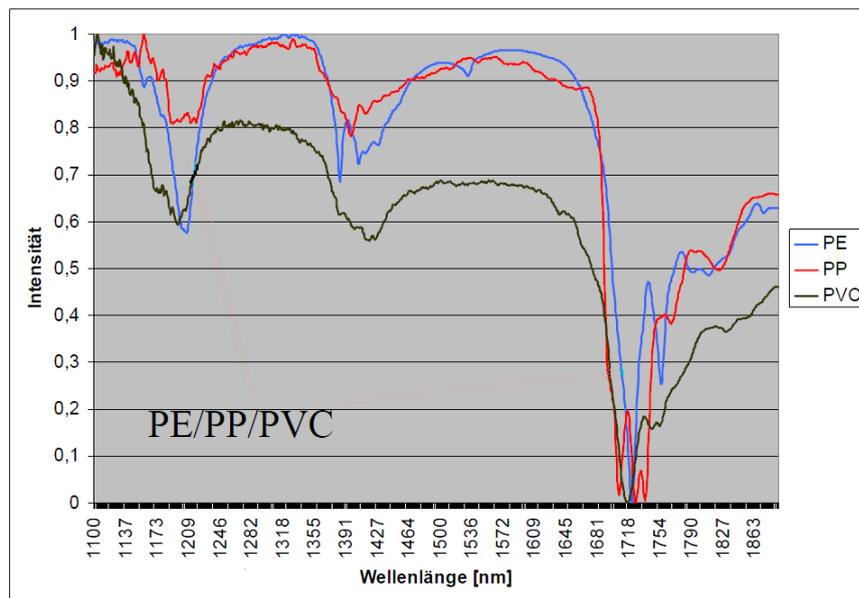


Abbildung 12: Spektren von PE, PP, PVC (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

Mittels eines NIR-Sensors können nun die Spektraldaten des Materials detektiert und digitalisiert werden. Dazu wird das Material, in diesem Fall der Abfallstrom, mit einem Nahinfrarotlicht bestrahlt. Das Material reflektiert einen Teil dieses Lichts. Dieser reflektierte Lichtanteil wird mit dem NIR-Sensor detektiert. Das digitalisierte Bild des Spektrums wird dann mit den Spektren von Vergleichsmaterialien in der

Datenbank verglichen. Aus diesem Vergleich erfolgt die Bestimmung des Materials. Die Auswerteeinheit berechnet die Position, beziehungsweise den Weg des Materials auf dem Förderband und gibt ein Signal an die Luftdüse. Diese erzeugt einen Luftimpuls und trennt somit das detektierte Material von dem Abfallstrom. Dieser Vorgang ist in Abbildung 13 dargestellt.

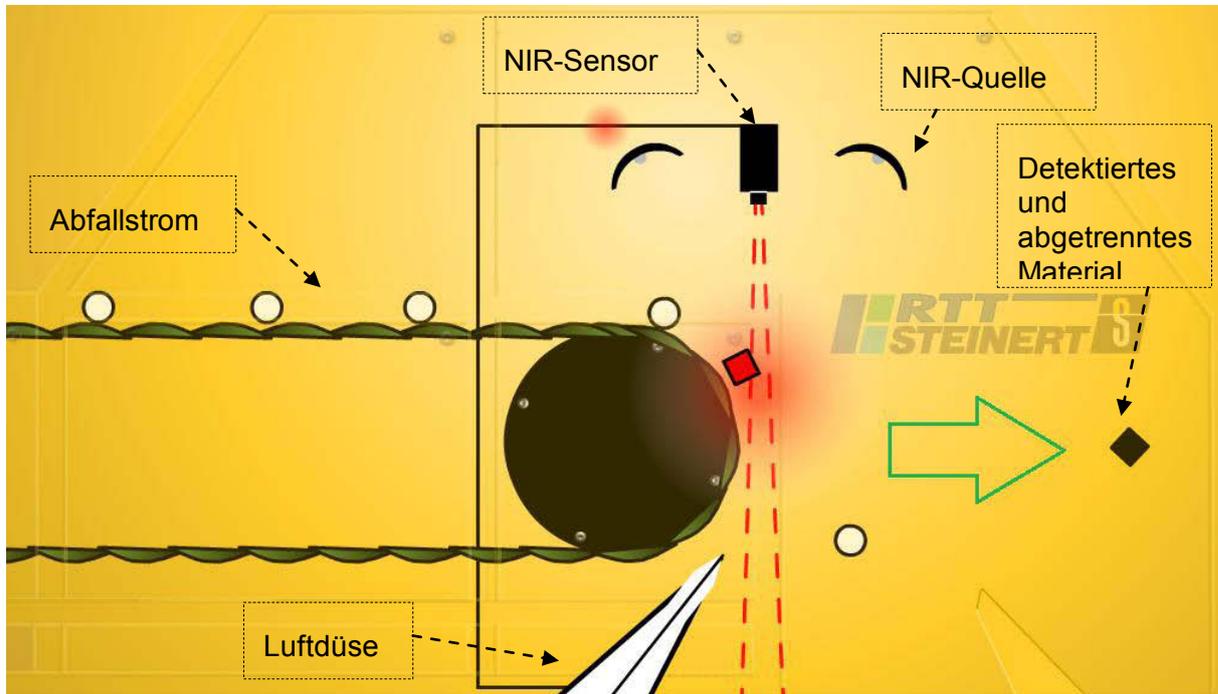


Abbildung 13: Nahinfrarotspektroskopie (STEINERT, 2012)

Nicht zuverlässig erkannt werden zum Beispiel schwarz eingefärbte und dunkle Kunststoffe. Je dunkler die Farbe, desto höher ist der Anteil der einfallenden Strahlung, der absorbiert wird und desto weniger wird reflektiert. Die Signale, die von dem NIR-Sensor empfangen werden, werden also mit zunehmender Dunkelheit des Materials immer niedriger. Somit wird eine effektive Detektion immer schwieriger.

Ein anderes Problem ergibt sich dadurch, dass nur die Oberfläche des Materials detektiert werden kann, da nur diese die ankommenden Strahlen auch reflektiert. Dies wird dann zu einem Problem, wenn das Material mit einer anderen Schicht überzogen ist, also zum Beispiel mit einer Lackierung oder mit einer Folie (EVK, 2006).

Abhilfe für diese Probleme ist eine Kombination mit anderen Sensoren, die zum Beispiel im sichtbaren Bereich arbeiten, wie in Kapitel 3.2.3 auch noch ausführlich behandelt wird.

In den letzten Jahren wurden vier verschiedene Basistechnologien für die NIR-Spektroskopie entwickelt und eingesetzt:

- Optischer Multiplexer (bis 1995)
- Rotierender Polygonspiegel (ab 1996)
- Scankopf und Kamera (ab 1997)
- NIR-Zeilenkamera (ab 2003)

Aktueller Stand der Technik ist der Einsatz von Zeilenkameras. Gründe dafür sind die günstigeren Preise für die Hardware beziehungsweise die stetigen Leistungssteigerungen der Software, wie zum Beispiel höhere Auflösung, Pixelrate oder Bildfrequenz.

Der begrenzende Faktor für die Leistung bei diesem System ist die Leistung des Sensors und das Datenmanagement. Während im Jahr 2006 noch NIR-Sensoren mit Auswerteeinheiten verwendet wurden, die nur eine Detektion von großen Objekten erlaubten, also größer als 5 x 5 cm, können heute standardmäßig Objekte mit 6 x 6 mm detektiert werden (STEINERT, 2012). Der Hersteller spricht hier von der Hyperspectral-Imaging-Technologie. Dieser Fortschritt war möglich durch den Einsatz hochauflösender NIR-Kameras, ein optimiertes Datenmanagement durch verbesserte Algorithmen und der Verwendung der dazugehörigen, leistungsfähigeren Computer-Hardware, mit der die gewaltigen Datenmengen schneller verarbeitet werden können.

Typischerweise müssen bei einer Sortierung mit diesem Verfahren in etwa 10 bis 1.000 Millionen Datenpunkte pro Sekunde erfasst und mit den Spektren, die in der Datenbank hinterlegt sind, verglichen werden. Während im Jahr 2006 noch 10.000 Datenpunkte pro Sekunde erreicht wurden, sind heute 27 Millionen Datenpunkte pro Sekunde Stand der Technik (STEINERT, 2012). Dies wurde durch verbesserte Kameras, aber auch durch neue Strategien der Abtastung (parallele Erfassung) erreicht (EVK, 2006).

Fallende Preise für Hardware beziehungsweise ständige Leistungssteigerungen, sei es bei den Kameras, sei es bei den anderen Komponenten wie zum Beispiel der Auswerteeinheiten, lassen auch in Zukunft erwarten, dass ständige Weiterentwicklungen stattfinden werden. Diese sind abhängig von den Fortschritten in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), die hierbei die Schlüsseltechnologie ist.

3.2.2.2 Farbsortierung

Vergleichbar mit dem vorher beschriebenen NIR-Verfahren ist die Sortierung anhand der Farben. Hierbei wird das visuelle Spektrum (VIS) detektiert, also der für den Menschen sichtbare Bereich, der zwischen 400 und 700 Nanometer liegt (siehe Abbildung 14).

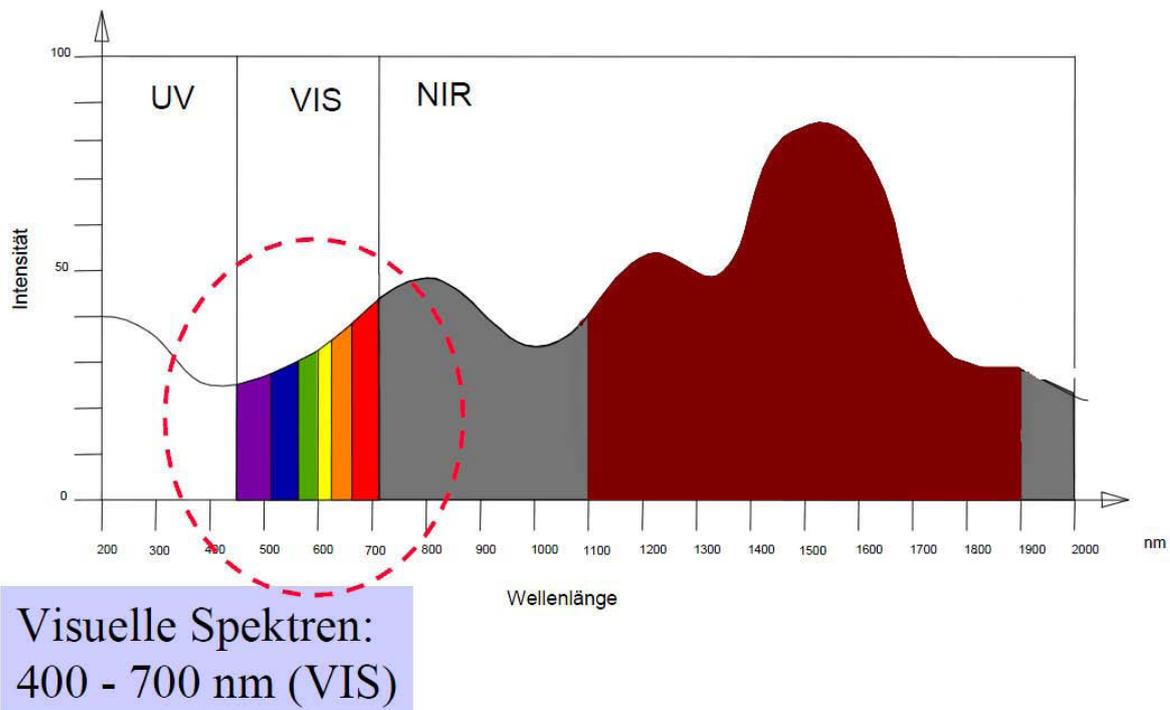


Abbildung 14: VIS im elektromagnetischen Spektrum (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

Neben der Farbe können aber auch Eigenschaften wie Helligkeit, Größe und Form des Objekts erkannt werden. Damit ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten für die Sortierung. So können zum Beispiel offenliegendes Kupfer oder dunkle bis schwarze Kunststoffe erkannt werden, die mit dem NIR-Verfahren, wie im vorigen Kapitel beschrieben, nicht erkannt werden (FAIST und RAGOSSNIG, 2008). Eine weitere Möglichkeit ist, edelmetallhaltige Platinen anhand der Farbe zu erkennen (grün) und auszusortieren (KULCKE et al., 2008).

Voraussetzung bei diesem Verfahren ist die Verteilung und Vereinzelung des Materials und zwar so, dass die Objekte nicht übereinander liegen und sich gegenseitig verdecken.

Der Ablauf dieses Verfahrens ist, wie in Abbildung 15 dargestellt, grundsätzlich gleich wie beim NIR-Verfahren. Das zu sortierende Gut wird auf einem Laufband dem Scanner zugeführt. Der Detektionsbereich wird entsprechend ausgeleuchtet. Der Sensor erkennt das zu detektierende Gut und gibt ein Signal an die Düsenleiste

(siehe Abbildung 16). Ein Druckluftimpuls bringt das Gut auf eine andere Laufbahn und trennt es somit vom restlichen Strom.

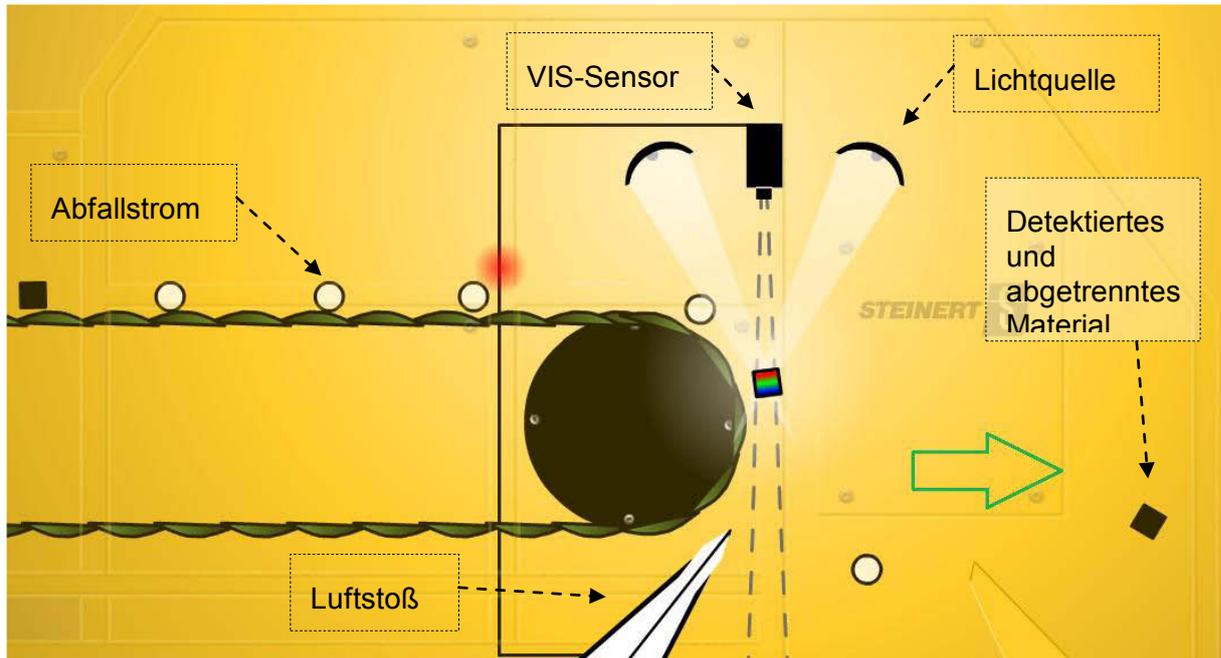


Abbildung 15: Farbsortierung (STEINERT, 2012)

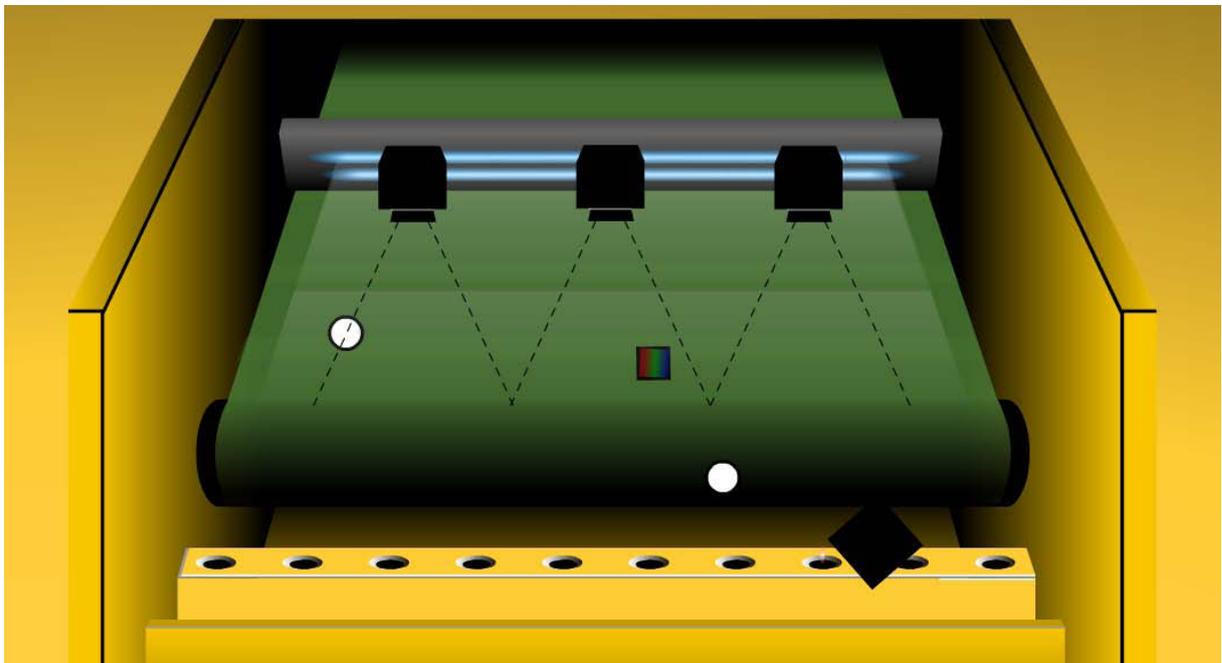


Abbildung 16: Farbsortierung Vorderansicht (STEINERT, 2012)

Bei diesem Verfahren werden Zeilenkameras eingesetzt. Es gelten also auch hier ähnliche Randbedingungen für Innovationen wie beim NIR-Verfahren (fallende Preise beziehungsweise ständige Leistungssteigerungen bei der Hardware und schnellere Algorithmen).

Bauteilrückgewinnung

Ein weiterer Anwendungsfall ist der Einsatz bei automatisierten Systemen zur Entstückung von Bauteilen bei der Demontage von Elektroaltgeräten. Hier gab es einige Entwicklungen für die Entstückung von Leiterplatten, die auch prototypisch umgesetzt wurden. Dabei wurden zwei Bildverarbeitungssysteme verwendet. Eines um die Bauteile auf der Leiterplatte zu lokalisieren, das andere, um die einzelnen Komponenten zu identifizieren. Bei der Identifikation wurde dabei auf eine Vergleichsdatenbank zurückgegriffen. Nach der Identifikation und der Bestimmung der Bauteile, die entfernt werden sollten, wurde diese Information an einen Industrieroboter weitergegeben, der dann je nach Komponente und nach der Art der Befestigung mit den dafür notwendigen Werkzeugen die Entnahme des Bauteils durchführen sollte (NASSOUR, 2006).

Diese Entwicklungen wurden allerdings nicht weiter fortgesetzt und aktuellere Projekte zu diesem Thema sind nicht vorhanden. Dies mag unter anderem daran liegen, dass die Leiterplatten nur schwer vom sonstigen Material zu trennen sind, da die Leiterplatten zumeist aufgrund der kompakten Bauweise schwer zugänglich sind oder weil uneinheitliche Schraubenformate verwendet werden (LANUV, 2011).

3.2.2.3 Röntgensortiertechnik

Der Einsatz von Röntgenstrahlung ist in der Abfallwirtschaft schon einige Jahre verbreitet und gehört in anderen Bereichen schon seit langem zum Stand der Technik, wie zum Beispiel in der Medizintechnik oder in der zerstörungsfreien Materialprüfung. Das Grundprinzip hierbei ist die Bestrahlung mittels elektromagnetischer Wellen (KRAINDL, 2010). Diese Strahlung befindet sich im Bereich von 10^{-1} nm bis 10 nm (siehe Abbildung 17). Hier haben die Strahlen die Eigenschaft Materie zu durchdringen, die sogenannte Röntgentransmission.

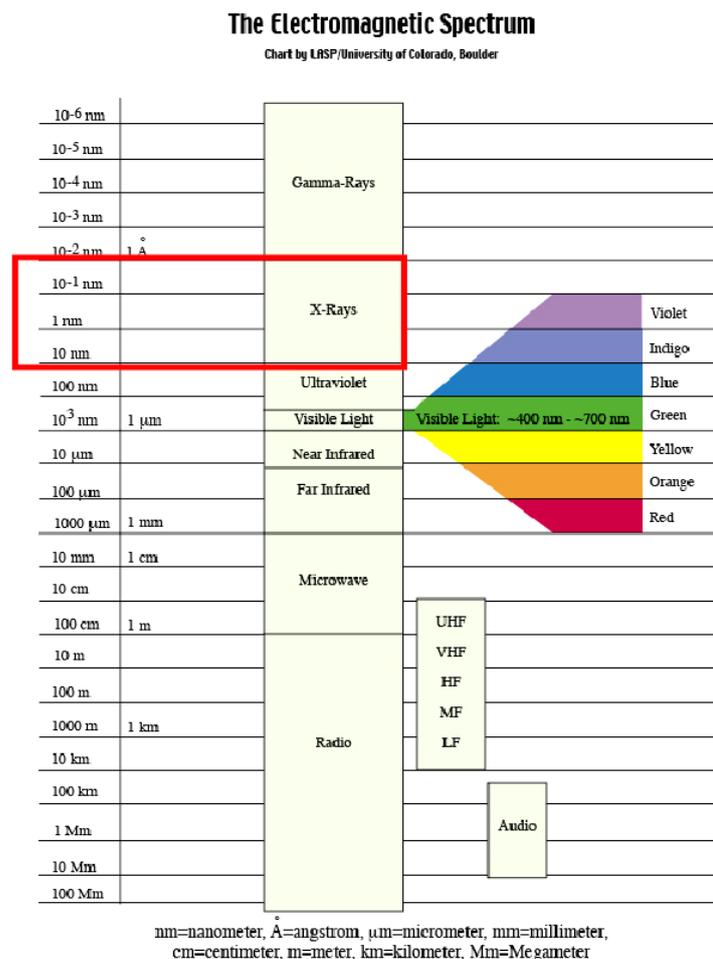


Abbildung 17: Elektromagnetisches Spektrum Röntgensortiertechnik (WEISS und FELBER, 2010)

Grundsätzlich wird in diesem Verfahren indirekt die atomare Zusammensetzung detektiert. Die Röntgenröhre emittiert Strahlung, die durch das Material dringt. Abhängig von der Materie, genauer gesagt von der atomaren Zusammensetzung, aber auch von der Materialdichte, wird diese Strahlung geschwächt. Der Detektor, meist eine einfache Zeilenkamera, nimmt diese Schwächung auf und verarbeitet diese. Die Differenz der eintretenden und der austretenden Strahlung lässt dann Rückschlüsse auf die atomare Zusammensetzung zu (ZEIGER, 2006).

Der Ablauf gleicht den zuvor beschriebenen Verfahren, also Zufuhr des Abfallstroms mittels Laufband, Bestrahlung durch eine Röntgenröhre, Detektion durch einen Sensor, Übermittlung der Daten an einen Rechner, Impuls durch einen Luftstoß und dadurch Aussortierung. In diesem Fall (Abbildung 18) ist im Gegensatz zu den vorigen Beispielen ein Luftstoß dargestellt, der von oben kommt und das auszusortierende Gut nach unten ablenkt und so vom Abfallstrom trennt.

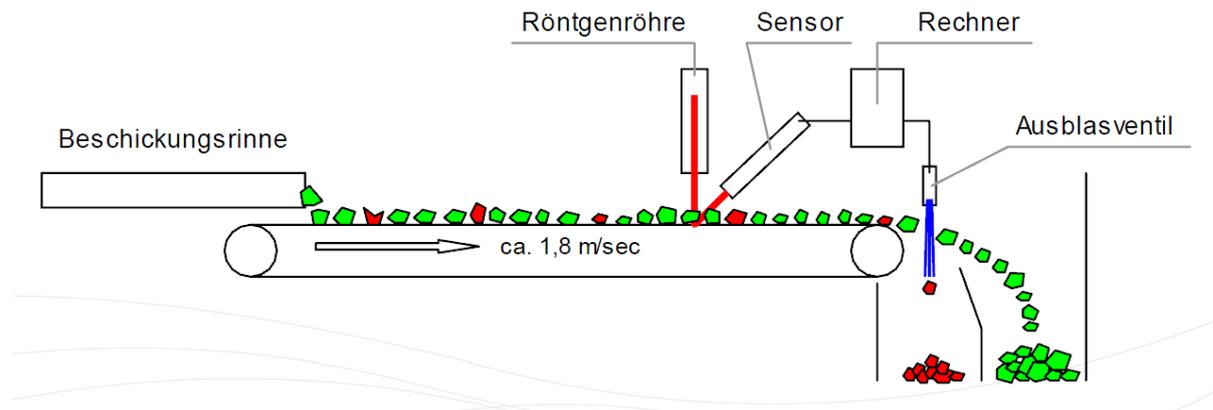


Abbildung 18: Röntgensortierung (WEISS und FELBER, 2010)

Während vor einigen Jahren nur eine unterschiedliche Schwächung der Röntgenstrahlung in verschiedenen Wellenbereichen detektiert werden konnte, ist der aktuelle Stand der Technik die Röntgen-Fluoreszenz Technologie. Mit dieser Technologie ist es möglich, im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren, die exakte elementare Zusammensetzung des Materials zu erkennen. Niederenergetische Röntgenstrahlung regt das Material an, das heißt, es kommt zu einem Herausschlagen kernnaher Elektronen und dadurch zu einem Zurückfallen von Elektronen aus einem höheren Energieniveau. Durch die freiwerdende Energie wird materialspezifische Fluoreszenz freigesetzt, welche mit einem Sensor erfasst wird. Damit stehen einerseits Informationen über die vorhandenen Elemente zur Verfügung, aber auch Informationen über deren Konzentration. Der Vorteil hierbei ist, dass diese Informationen unabhängig von der Oberfläche gewonnen werden können. Somit ist eine noch genauere Sortierung möglich, zum Beispiel bei der Erkennung und Aussortierung von Kupfer, das zumeist verbaut ist, wie zum Beispiel als Spulen in Elektromotoren (TITECH, 2012).

3.2.2.4 Induktionssortierung

Für Metalle, die mit Magnetabscheidung und Nichteisensortierung nicht aussortiert werden können, kommt die Induktionssortierung zum Einsatz. Hierbei wird die elektrische Leitfähigkeit detektiert. Dazu werden elektromagnetische Schwingungen ausgesendet, die von elektrischen Leitern, also dem auszusortierenden Gut, das sich darüber bewegt, verändert werden. Diese Veränderung wird detektiert und ausgewertet (KRAINDL, 2010). Diese Information wird dann an eine zentrale Steuerung weitergegeben und durch Druckluftimpulse werden diese detektierten Materialien aussortiert. Angewendet wird dieses Verfahren vor allem bei der Aussortierung von Edelstahl und anderen Restmetallen (STEINERT, 2012).

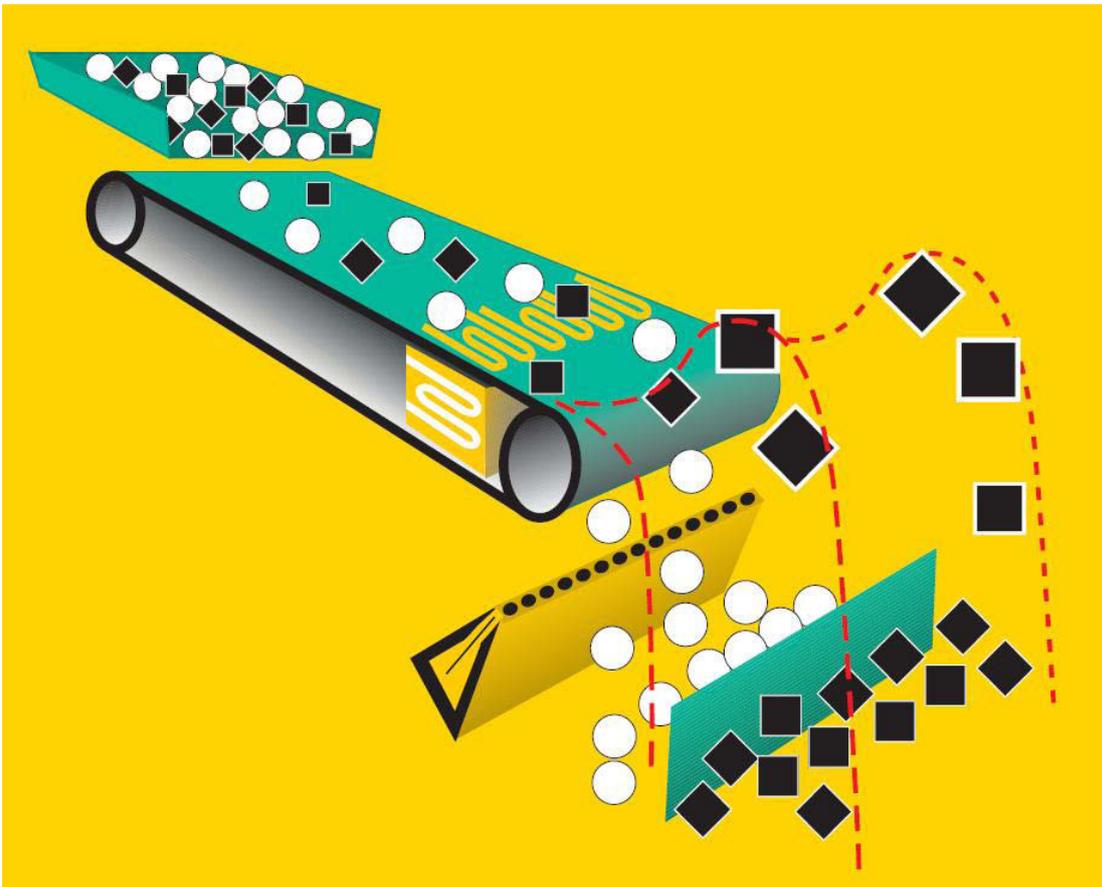


Abbildung 19: Induktionssortierung (STEINERT, 2012)

Bei diesem Verfahren sind keine wesentlichen Innovationen feststellbar, aber in Kombination mit anderen Verfahren ergeben sich Verbesserungen und gänzlich neue Anwendungsgebiete.

3.2.3 Multisensorsysteme

Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren haben die Gemeinsamkeit, dass verschiedene Sensoren in einem Sortierschritt zusammengefasst und kombiniert werden. Diese sogenannten Multisensorsysteme ermöglichen eine gleichzeitige Detektion und Auswertung unterschiedlicher Materialeigenschaften und bieten somit neben qualitativen Steigerungen auch ökonomische Vorteile. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich diese Anlagen durch Updates der Software oder eine neue Software schnell in der Leistung verbessern lassen, beziehungsweise sogar an neue Sortieraufgaben angepasst werden können (KLANERT und CORD-LANDWEHR, 2010). Durch den Einsatz dieser Multisensorsysteme ergeben sich gänzlich neue Sortiermöglichkeiten, die bis dato noch nicht möglich waren. Exemplarisch werden hier drei verschiedene Systeme vorgestellt.

3.2.3.1 VIS/NIR Spektroskopie

Hierbei werden die Farberkennung und die Erkennung im Nahinfrarotbereich kombiniert. Wie in Abbildung 20 dargestellt, wird sowohl das visuelle Spektrum als auch das NIR-Spektrum detektiert.

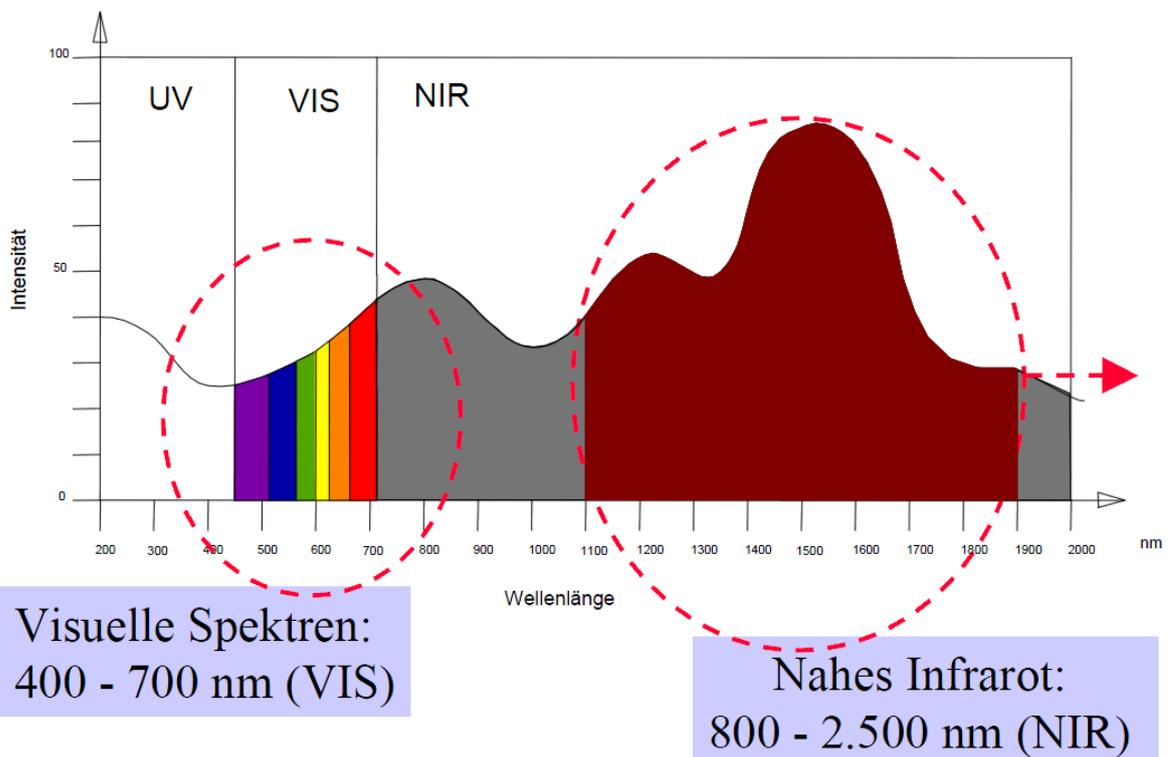


Abbildung 20: Elektromagnetisches Spektrum VIS/NIR (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

Somit können die Vorteile von Farberkennung und NIR-Spektroskopie vereinigt und ergänzt werden (BAIRD et al., 2009). Ein Vorteil der Farberkennung ist, dass viele Algorithmen für die Auswertung zur Verfügung stehen und dadurch eine robuste Erkennung mit geringer Rechenleistung möglich ist. Somit ist der Zusatzaufwand zur Ergänzung des NIR-Verfahrens mit der Farberkennung sehr gering. Auch kann die Farberkennung zusätzliche Detektionsmöglichkeiten mit einbringen, wie zum Beispiel neben der Erkennung der Farbe auch die Erkennung der Form (BURGSTALLER, 2010).

Bei bisherigen Kombinationen der beiden Verfahren Farberkennung und NIR-Spektroskopie wurde zum Beispiel der NIR-Detektor um eine Kamera zur Farberkennung ergänzt. Hierbei tritt dann aber das Problem auf, dass das Zusammenführen der getrennt erfassten Daten schwierig ist. Unterschiedliche räumliche Auflösungen und unterschiedliche Messbereiche führen zu komplexen und aufwändigen Auswertungen.

Ein verbessertes Verfahren kombiniert beide Einheiten in einem Detektor, womit eine gleichzeitige Messung an der gleichen Position erfolgt. Somit steht ein Detektor zur Verfügung, der beide Spektren erfassen kann, also gleichzeitig das visuelle Spektrum und das nahe Infrarot-Spektrum. Abbildung 21 stellt diese Kombination schematisch dar. Der einfallende Lichtstrahl trifft zunächst auf den Strahlenteiler (Komponente 1). Dort wird der Strahl aufgeteilt in einen Strahl, der in das VIS-Modul umgeleitet wird (Komponente 3) und in einen Strahl, der in das NIR-Modul umgeleitet wird (Komponente 2). Dadurch, dass die Daten in einem Interface Bord (Komponente 4) zusammenlaufen, entfällt das Zusammenführen unterschiedlicher Daten aus unterschiedlichen Detektoren. Es wird also derselbe Lichtstrahl in einer Einheit detektiert und ausgewertet, sowohl bezüglich dem visuellen Spektrum als auch dem NIR Spektrum (BALTHASAR und REHRMANN, 2006).

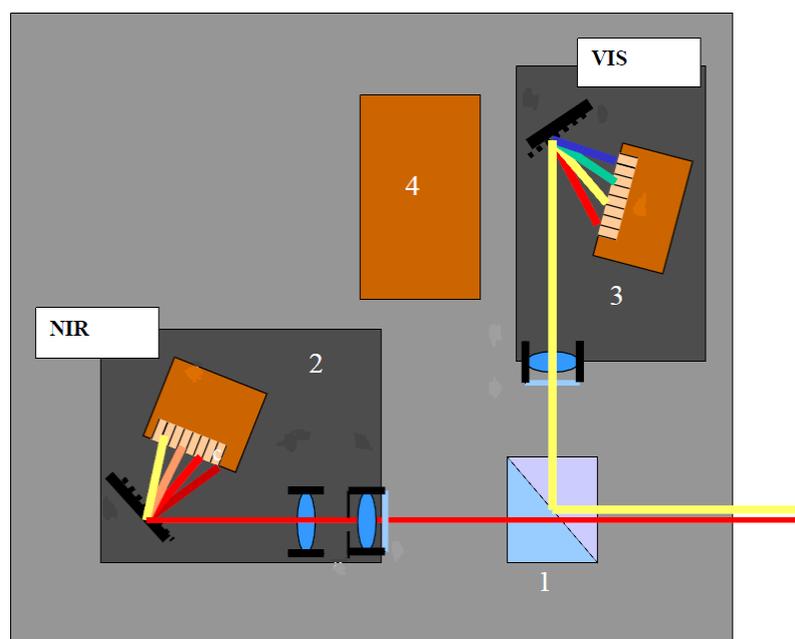


Abbildung 21: Schematische Darstellung VIS/NIR Detektion (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)

3.2.3.2 *TiTech Kabelrückgewinnung*

Bei diesem Sortiersystem werden zwei verschiedene Verfahren eingesetzt, ein elektromagnetischer Sensor, der feine Metallteile anhand ihrer Leitfähigkeit erkennt, und ein hochauflösender NIR-Detektor, der Gummi, Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyvinylchlorid (PVC) identifizieren kann.

Kupferkabel sicher zu erkennen ist mit den zuvor beschriebenen Verfahren schwer möglich. Zur weiteren Aufbereitung von Kupfer ist aber eine hohe Sortierenreinheit erforderlich, deshalb besteht Bedarf an einer Sortiertechnologie, mit der Kupfer und Kupferkabel zuverlässig erkannt werden können. Nicht zuletzt die steigenden Rohstoffpreise sind ein starker Treiber für den Einsatz eines solchen Systems.

Die Kombination eines elektromagnetischen Sensors und eines NIR-Detektors erlaubt nun eine solche Sortierung. Wie in Abbildung 22 dargestellt, ist dieser Schritt zumeist in eine Gesamtanlage integriert. Das heißt, zunächst ist es erforderlich, dass das Ausgangsmaterial geschreddert und in definierte Korngrößen gesiebt wird. Dann erfolgt die Abscheidung von Eisen und Nichteisenmetallen mittels Magnetscheider und Wirbelstromscheider. Anschließend wird das verbleibende Metall abgetrennt (TITECH finder), in dem auch die Kupferkabel enthalten sind, die dann schließlich von dem Metall getrennt werden (TITECH finder [poly]). Abbildung 23 zeigt exemplarisch das Ergebnis dieses Verfahrens (TITECH, 2012).

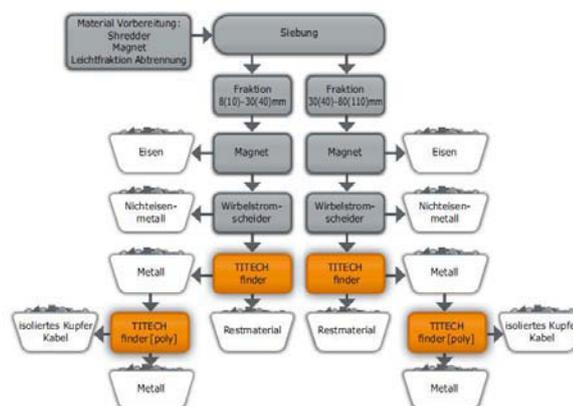


Abbildung 22: Schematische Darstellung Kabelrückgewinner (TITECH, 2012)



Abbildung 23: Ergebnis der Sortierung mit Kabelrückgewinner (TITECH, 2012)

3.2.3.3 *Projekt SpectroDense - Kunststoff-Rezyklate aus Elektroaltgeräten*

Unter der Konsortialführung von Fraunhofer IVV wurde von 2008 bis 2011 das Projekt „SpectroDense - Verkehrsfähige Polymerrezyklate aus Elektroaltgeräten durch spektroskopische Sortierung und dichte-basierte Störstoffabtrennung“ durchgeführt. Das Vorhaben wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Neben Fraunhofer IVV waren noch die Brandenburgische Technische Universität Cottbus, das Institut für Polymerforschung Dresden, fünf Elektroaltgeräte-Demontagebetriebe, zwei Maschinenbauunternehmen (Flottweg AG, RTT GmbH, Erlos GmbH (Kunststoffrecycling) und Reifra Kunststofftechnik GmbH an dem Forschungsprojekt beteiligt.

Ziel des Projekts war es, die technische und ökonomische Machbarkeit zu erbringen, dass Kunststoffe aus Elektroaltgeräten effizient gewonnen werden können. Umgesetzt wurde dies durch eine Kombination neuer Ansätze in den Bereichen:

- Materialstrommanagement im Demontagebetrieb
- Verbesserung des Materialaufschlusses
- Spektroskopische und/oder dichte-basierte Sortierverfahren

Der Hauptfokus lag auf den Sortierkonzepten und vor allem auf der Trenntechnik mittels Kombination der Verfahren Spektroskopie und Dichtemessung. Das bedeutet, dass eine vollautomatische, sensorgestützte, optische Sortierung mit einer Störstoffelimination mittels eines dichte-basierten Trennverfahrens ergänzt wurde. Die Restfraktionen werden dem CreaSolv-Prozess zugeführt (siehe Kapitel 4.5). Im Anschluss daran werden alle Fraktionen noch polymertechnisch veredelt.

Bisher scheiterte ein Recycling von Kunststoffen aus Elektroaltgeräten daran, dass keine reinen und schadstoffarmen Rezyklate produziert werden konnten. Dies lag daran, dass keine Trennung der vielfältigen Kunststoffsorten, die zum Teil auch schadstoffhaltig sind (zum Beispiel Schwermetallpigmente und halogenierte Flammschutzmittel), möglich war. Mit diesem innovativen Verfahren soll dies möglich sein und in weiterer Folge sollen die Recyclingprodukte als Ausgangsmaterial für Spritzguss eingesetzt werden (FRAUNHOFER, 2012a).

3.3 Metallurgie

Als metallurgische Verfahren können klassischerweise drei Verfahren genannt werden, deren Einsatzmöglichkeiten im Folgenden auch beschrieben werden: Hydrometallurgie, Pyrometallurgie und Biometallurgie. Alle Verfahren sind in der Metallurgie, insbesondere im Bereich der Gewinnung der Ausgangsstoffe, sehr lang bekannt (Pyrometallurgie und Hydrometallurgie) beziehungsweise schon einige Jahre bekannt (Biometallurgie) und im Einsatz (DITTMAYER et al., 2006). Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Verfahren für Elektroaltgeräte sind in einem unterschiedlichen Stadium und sollen in diesem Kapitel vorgestellt werden.

3.3.1 Hydrometallurgie

Analog zu den pyrometallurgischen Prozessen, die in Kapitel 3.3.2 beschrieben werden, ist die Hydrometallurgie nach der Trennung angesiedelt und dient unter anderem zur Extraktion der Edelmetalle, die dann zu reinen Metallen raffiniert werden und somit als Sekundärrohstoffe vermarktet werden.

Hydrometallurgie, oder auch nasschemisches Verfahren genannt, ist der Überbegriff für Verfahren, die hauptsächlich bei der Metallgewinnung eingesetzt werden, um die metallischen Teile, wie zum Beispiel Kupfer, Nickel oder Kobalt, aus den Erzen zu lösen. Dabei kommen hauptsächlich die Methoden Laugung, Lösungsmittelextraktion oder Elektrolyse zum Einsatz (SOHN, 2001). Während im Bereich der Metallgewinnung die Hydrometallurgie schon eine sehr lange Tradition hat, spielt dieses Verfahren in der Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten noch eine eher unbedeutende Rolle.

Die Nachteile dieses Verfahrens, insbesondere gegenüber der Pyrometallurgie, liegen zum einen in der Komplexität des Prozesses und somit darin, dass dieser auch sehr empfindlich gegenüber der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials ist. Außerdem werden die geringen Reaktionsgeschwindigkeiten als Nachteil genannt, sowie die in diesem Prozess entstehenden Rückstände, die zum Teil hohe Belastungen aufweisen (zum Beispiel im Abwasser) und die daraus entstehenden Entsorgungsprobleme (DITTMAYER et al., 2006). Wobei auch gegensätzliche Meinungen in der Literatur zu finden sind. Zum Beispiel merken SOHAILI et al. (2012) an, dass die Hydrometallurgie exakter, vorhersehbarer und der Prozess, im Vergleich zur Pyrometallurgie, einfacher zu kontrollieren sei. HAGELÜKEN (2010a) merkt kritisch an, dass bei den meisten hydrometallurgischen Verfahren nur eine bestimmte Substanz betrachtet wird, für die das Verfahren entwickelt oder optimiert wurde (zum Beispiel Gold, Kupfer). Das kann zur Folge haben, dass die anderen im Abfall enthaltenen Edelmetalle, die nicht behandelt werden, nicht als Verluste gerechnet werden, wenn eine Gesamtbilanz erstellt wird und somit unscharfe Ergebnisse erreicht werden.

Nichtsdestotrotz wird die Einsatzmöglichkeit dieses Verfahrens insbesondere im Bereich der Elektro- und Elektronikaltgeräte weiter erforscht, insbesondere für die Behandlung von Leiterplatten. Hierbei werden schwerpunktmäßig Verfahren

betrachtet, mit denen Kupfer, Blei und Zinn, sowie Edelmetalle wie Gold, Silber oder Palladium rückgewonnen werden können (LUDA, 2011). Auch für die Rückgewinnung von NE-Metallen sind einige Verfahren in Entwicklung, wobei diese Fraktionen vor einer weiteren Verarbeitung thermisch behandelt werden müssen (SOHAILI et al., 2012). Andere Forschungsarbeiten beschäftigen sich stark mit dem Einsatz verschiedener Lösungsmittel und hierbei speziell mit den Einsatzmöglichkeiten umweltverträglicher Lösungsmittel (KAMBEROVIC et al., 2009).

Die folgenden Punkte sind grundsätzlich bei der hydrometallurgischen Behandlung von Leiterplatten zu beachten, beziehungsweise erschweren diese:

- Das hydrometallurgische Verfahren eignet sich hauptsächlich für monometallische Produkte oder einfach gestaltete Materialien und für das Ablösen der Metalle von Oberflächen. Leiterplatten sind dagegen eher komplex aufgebaut, was gegen dieses Verfahren spricht.
- Im Fokus der Entwicklungen steht meist die Gewinnung eines einzelnen oder einer definierten kleinen Gruppe von Metallen. Allerdings sind Leiterplatten sehr inhomogen aufgebaut und bestehen zumeist aus einer Vielzahl unterschiedlicher Metalle, die auch in dem Prozess berücksichtigt werden müssten, aber oft nicht berücksichtigt werden. Weiter werden die Abfallströme und die entstehenden Nebenprodukte (Abwässer, Löserückstände) oft nur am Rande betrachtet.
- Für eine optimale Trennung ist eine starke Zerkleinerung der Leiterplatten notwendig, das führt aber zu ungewollten Nebeneffekten, nämlich zu erheblichen Staubmengen die bei diesen Verfahren entstehen können (z.B. beim Schreddern) und somit zu zusätzlichen Verlusten von Edelmetallen. Außerdem kann sich durch etwaiges Feinmahlen der Leiterplatten aus den enthaltenen Flammschutzmitteln Dioxin bilden.
- Hydrometallurgische Verfahren benötigen Reagenzien wie zum Beispiel Zyanide, Salzsäure, Salpetersäure oder Königswasser. Dies erfordert Sicherheitsmaßnahmen an den Arbeitsplätzen und eine anspruchsvolle Lagerung und Entsorgung.

Diese Punkte erschweren den Einsatz dieses Verfahrens, da ein hoher Einsatz von Technologie erforderlich ist (HAGELÜKEN, 2010a).

Viele Entwicklungen im Bereich der Hydrometallurgie befinden sich noch im Laborstadium, prototypische Versuche, die den Nachweis der Praxistauglichkeit liefern, sind daher meist noch nicht vorhanden, beziehungsweise nur für spezielle Produktgruppen vorhanden. So wurde zum Beispiel in dem Projekt „HydroWEEE - Innovative Hydrometallurgical Processes to recover Metals from WEEE including lamps and batteries“, das von 2009 bis 2012 durchgeführt und im 7. Rahmenprogramm der EU gefördert wurde, eine mobile Anlage entwickelt. Mit dieser soll mittels hydrometallurgischer Verfahren hauptsächlich Kupfer, Magnesium, Zink,

Indium und andere Stoffe, in hoher Reinheit insbesondere aus Leiterplatten, LCD-Bildschirmen (Liquid Crystal Display-Bildschirme), Batterien und Lampen rückgewonnen werden. Erste Ergebnisse zeigen eine technische und ökonomische Machbarkeit (SAT-RESEARCH, 2012). Genauere Erkenntnisse über die Qualität, Kosten und andere Parameter für diese mobile Anlage liegen noch nicht vor.

Allgemein ist zu beobachten, dass sich gerade in den letzten Jahren viele Projekte mit der Hydrometallurgie beschäftigen. Treiber scheint hier einerseits der vorhandene Bedarf nach Recyclingtechnologien für Leiterplatten zu sein, und andererseits der erwartete Anstieg an Elektromobilität und die damit zunehmende Anzahl an Batterien, die zukünftig behandelt werden müssen. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 4 noch genauer eingegangen.

3.3.2 Pyrometallurgie

Dieser Begriff bezeichnet alle metallurgischen Verfahren, die bei hohen Temperaturen ablaufen, also bei Temperaturen zwischen 200°C und 3000°C. Das Grundprinzip ist die thermische Zersetzung des eingesetzten Materials, also das Aufschmelzen (DITTMAYER et al., 2006). Hierbei werden hauptsächlich Kupfer, Blei und Nickel gewonnen (HAGELÜKEN und MESKERS, 2010b). Für Elektroaltgeräte werden folgende Prozesse eingesetzt: Verbrennung, Aufschmelzung in Plasmabogen-Öfen oder Hochöfen, Versinterung oder das Aufschmelzen in der Gasphase bei hohen Temperaturen (KAMBEROVIC et al., 2011). Als Vorteil der pyrometallurgischen Verfahren wird zumeist angeführt, dass die unedlen Metalle wie zum Beispiel Eisen und Aluminium und Kohlenstoff als Energieträger im Prozess verwendet werden können. Allerdings können diese somit auch nicht recycelt werden, was wiederum als Nachteil betrachtet werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Qualität der Metalle, die recycelt wurden. Nachteilig in diesem Prozess ist, dass große Abgasmengen entstehen und dass dieses Verfahren große Mengen an Energie benötigt (FRIEDRICH, 2009). Außerdem wird angeführt, dass neben Abgasproblemen auch Lärmprobleme entstehen (DITTMAYER et al., 2006) und der Gesamtprozess hohe Investitionskosten erfordert (KAMBEROVIC et al., 2011).

Das bekannteste und bewährteste Beispiel ist der Schmelzprozess von Kupfer, genauer gesagt, der Sekundärkupferprozess. Hierbei werden Materialien eingesetzt, die einen ausreichend hohen Anteil an Kupfer enthalten und geringe Mengen an Edelmetallen, wie zum Beispiel Leiterplatten, aber auch Abfallprodukte wie Schlacken oder Anodenschlämme. Während des Schmelzprozesses dient das Kupfer als sogenanntes Sammlermetall. Das heißt, die Edelmetalle binden sich in das Kupfer ein. Die Kunststoffanteile werden als Energieträger genutzt, sprich sie verbrennen, und die unedlen Bestandteile wie zum Beispiel Glas oder Aluminium werden in der Schlacke eingebunden. In dem nächsten Schritt wird das Kupfer durch Elektrolyse gereinigt, was bedeutet, dass die Edelmetalle abfallen und das Kupfer schließlich in einer sehr hohen Reinheit vorliegt. In einem weiteren Schritt können dann die Edelmetalle verarbeitet und rückgewonnen werden (LANUV, 2011). Die Rückgewinnung der Edelmetalle aus den sogenannten Anodenschlämmen erfolgt entweder durch pyrometallurgische oder hydrometallurgische Verfahren, oder durch eine Kombination beider in mehrstufigen Prozessen (AMER, 2002). Diese Verfahren

werden vor allem für die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Anodenschlämmen, die bei der Metallgewinnung anfallen, eingesetzt. In zunehmendem Maße werden diese Verfahren auch im Recycling für Edelmetalle und andere Stoffe wie zum Beispiel Sondermetalle interessant (MERKEL und FRIEDRICH, 2011).

In Europa existieren drei Anlagen, die nach dem Prinzip des Sekundärkupferprozesses arbeiten, Aurubis in Deutschland, Boliden in Skandinavien und Umicore in Belgien. Abbildung 24 zeigt den schematischen Ablauf dieses Prozesses in der Anlage der Firma Umicore.

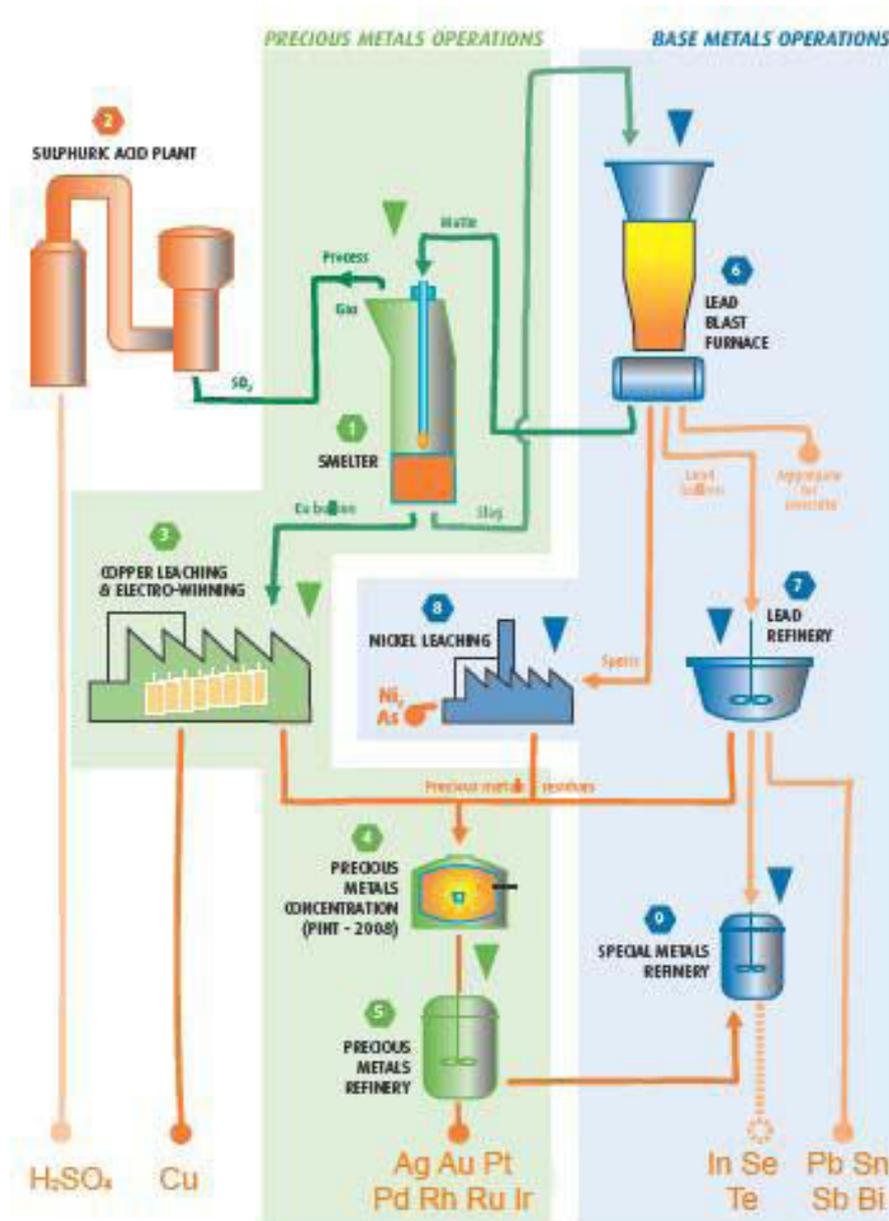


Abbildung 24: Schematischer Prozess Umicore (LANUV, 2011)

In dieser Anlage wird jährlich mehr als 350.000 Tonnen Material verarbeitet, zum Beispiel Katalysatoren, Leiterplatten, Mobiltelefone (nach Entnahme der kobalthaltigen Lithium-Ionen-Akkumulatoren), Schlacken, Anodenschlämme,

Kupferstein oder Edelmetalle (HAGELÜKEN, 2006). In der Erweiterung des oben beschriebenen Prozesses wird in dieser Anlage die Primärschlacke, die in dem ersten Schritt entsteht, nochmals raffiniert, wobei Blei und andere NE-Metalle abgetrennt werden. Auch hier werden wieder Edelmetalle zurückgewonnen. Dieses Verfahren hat sich zur Rückgewinnung von Edelmetallen bewährt und es stehen in Europa dafür ausreichend Kapazitäten zur Verfügung.

Wie schon in Kapitel 2.1.1 angeführt, müssen bei Smartphones, aber auch bei Mobiltelefonen und Notebooks, vor der pyrolytischen Behandlung die Akkus, genauer gesagt die Lithium-Ionen-Akkumulatoren entfernt werden. Diese enthalten Kobalt, das in einem eigenen Prozess, ebenfalls ein Pyrolyseprozess, recycelt werden kann. Aus technischer Sicht ist es allerdings trotzdem möglich in modernsten Anlagen diese Geräte ohne Entfernung der Akkus pyrolytisch zu behandeln, wie zum Beispiel bei der Firma Boliden in Norwegen (LEHNER, 2003). Voraussetzung für solche integrierten Anlagen ist eine moderne und effektive Abgasreinigung (HAGELÜKEN, 2010a).

Für die Behandlung der Akkus gibt es in der industriellen Anwendung schon einige bewährte Prozesse, so zum Beispiel für Kobaltkatalysatoren (SCHLUEP et al., 2009). Speziell für das Recycling von Batterien wurde 2011 von der Firma Umicore eine neue Anlage eröffnet, die pyrometallurgisch Lithium-Ionenbatterien und Nickelmetallhydrid-Batterien recycelt. Die jährliche Kapazität liegt bei 7000 Tonnen, das entspricht in etwa 250 Millionen Batterien von Mobiltelefonen (UMICORE, 2011). Hauptsächlich sollen hier Batterien aus Notebooks, Mobiltelefonen und Smartphones verarbeitet werden, aber die Anlage ist auch schon für Batterien aus dem Antriebsbereich vorgesehen, also für Batterien aus Elektrofahrzeugen (LANUV, 2011).

Insbesondere für Lithium-Ionenbatterien, die in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, sind einige Entwicklungen im Bereich der Pyrometallurgie festzustellen. In Deutschland sind von 2009 bis 2011 zwei sogenannte Verbundprojekte gefördert worden, die sich mit dem Recycling dieser Batterien befassen haben. Zum einen das Projekt „LiBRi – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative - Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge“ und zum anderen das Projekt „LithoRec – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“.

Für das Projekt LiBRi, das gemeinsam von Umicore AG & Co. KG, Daimler AG, Öko-Institut und TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik durchgeführt wurde, sind folgende Ziele angegeben worden:

- Entwicklung einer industriellen Lösung für ein effizientes und umweltverträgliches Recycling von Batterien für Elektrofahrzeuge
- Entwicklung eines pyrometallurgischen Verfahrens im Pilotmaßstab

- Entwicklung eines recyclinggerechten Produktdesigns für Batterien und eine dafür geeignete Gesamtprozesskette von Sammlung, Logistik, Vorzerlegung bis hin zum Aufarbeitungsprozess (TREFFER et al., 2011)

Im Projekt LithoRec wurden Rücknahme- und Recyclingkonzepte erforscht und die Einführung derselben konzeptionell vorbereitet. Im Gegensatz zum Projekt LiBri steht hier allerdings die Entwicklung eines hydrometallurgischen Verfahrens zur Rückgewinnung von Lithium, Kobalt und weiteren wertvollen Stoffen im Vordergrund. Grundgedanke hierbei ist die Entwicklung eines Kreislaufkonzepts (siehe Abbildung 25). Durchgeführt wurde das Verbundprojekt von AUDI AG, H.C. Starck, Chemetall, Electrocyling, Evonik Litarion, Fränkisches Recycling Zentrum, I+ME Actia, Recylex, SüdChemie, Volkswagen, TU Braunschweig, Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik und WWU Münster (BÄRWALDT, 2010).

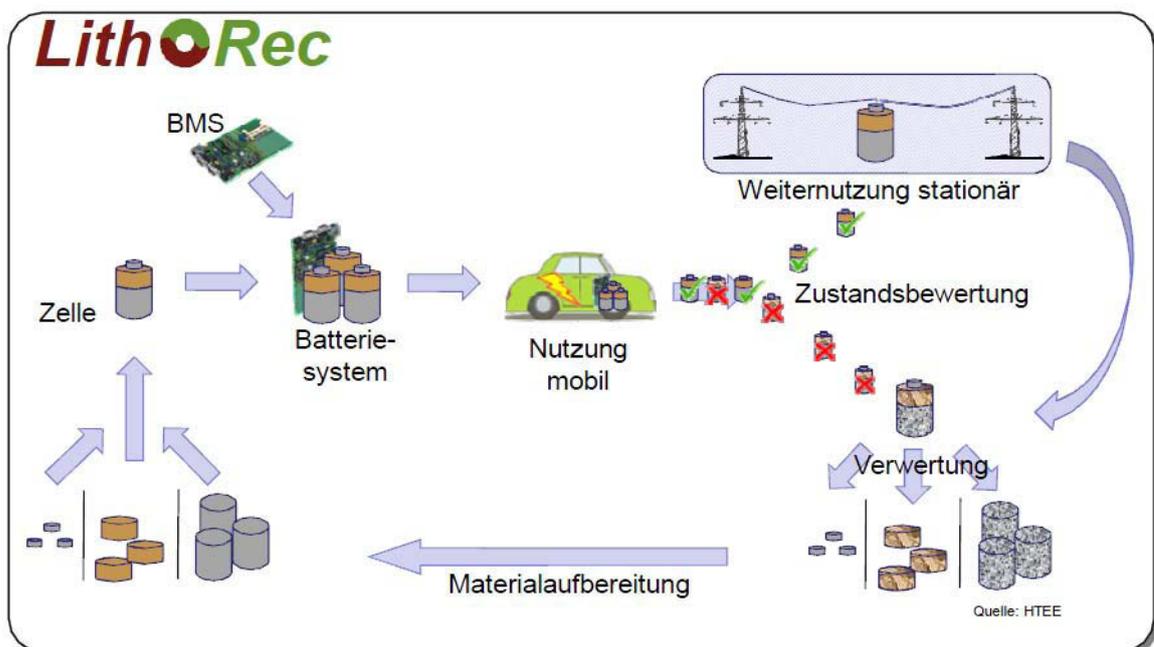


Abbildung 25: Schema Projekt LithoRec (BÄRWALDT, 2010)

Beide Projekte fallen nicht direkt in das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, aber diese Beispiele sollen zeigen, wie Innovation ausgelöst oder beschleunigt wird, in diesem Fall durch die Annahme, dass in den nächsten Jahrzehnten der Anteil an Elektrofahrzeugen sehr stark ansteigen wird. Das bedeutet, dass neue Recycling- und Entsorgungskonzepte notwendig sein werden, die in naher Zukunft auch umsetzbar sind, damit auf die steigende Anzahl von Batterien reagiert werden kann, die bis dahin am Markt sein werden.

Ein weiteres Beispiel für eine Entwicklung in diesem Bereich ist die Haloclean-Methode. Diese basiert auf der Behandlung von Leiterplatten und Kunststoffen aus Elektroaltgeräten durch Pyrolyse und hat primär die Rückgewinnung von Rohstoffen, wie zum Beispiel der Halogene, zum Ziel. Wie in Abbildung 26 dargestellt, müssen die Elektroaltgeräte zunächst demontiert und grob zerkleinert werden. Anschließend findet eine zweistufige Pyrolyse statt, zunächst bei 300 bis 400°C und dann bei 400

bis 500°C, wobei die jeweilige Verweilzeit zwischen 30 Minuten und mehreren Stunden beträgt. Die in diesen zwei Stufen entstehende Gasphase wird gesammelt und thermisch-chemisch nachbehandelt. In den Dämpfen sind drei Produkte enthalten: Brom, bromangereichertes Pyrolyseöl und Pyrolysegas. Während letzteres zum Einsatz für Prozessenergie genutzt werden kann, stehen die beiden ersteren wieder als Rohstoffe zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung, wobei Brom bei der Herstellung von Flammschutzmittel eingesetzt werden kann und das Pyrolyseöl als Sekundäröl in der chemischen Industrie Verwendung finden kann. Als weiteres Produkt entsteht der Rückstand, der aus einer Grobfraction (Eisen und Buntmetalle) und einer Feinfraction (Pyrolysekoks, Inerte und Edelmetalle) besteht. Diese Fraktionen können in einem Kupferschmelzofen weiterverarbeitet werden um daraus die verbliebenen Edelmetalle zu gewinnen.

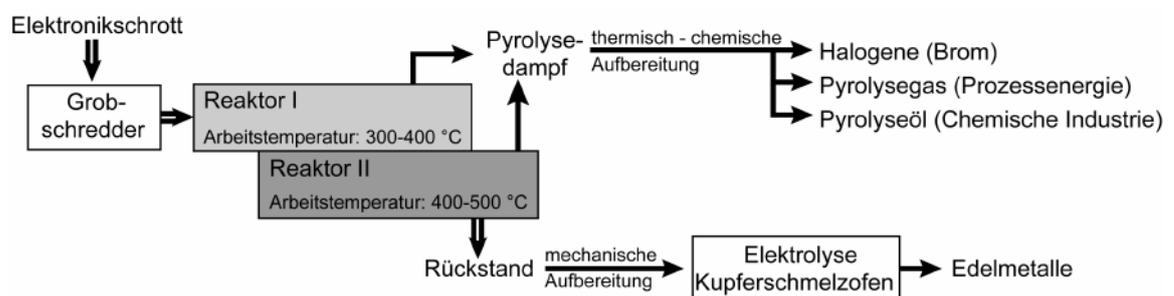


Abbildung 26: Prozessschema Haloclean-Pyrolyse (KOCH, 2007)

Dieser Prozess ist die Weiterentwicklung eines Prozesses zur Fraktionierung von Thermoplasten, wie zum Beispiel PVC. Dort wird das in jeder Stufe entstehende Produkt jeweils getrennt gesammelt. Bei der Anwendung dieses Verfahrens auf Elektroaltgeräte wurde zunächst davon ausgegangen, dass auch hier die getrennte Erfassung sinnvoll wäre. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die entstehenden Pyrolyseöle alle identisch sind und eine Trennung keinen Vorteil bringt. Trotzdem wurde die zweistufige Pyrolyse beibehalten, da nur bei einer mehrstufigen Pyrolyse die Merkmale des Rückstands, die für eine Weiterverarbeitung notwendig sind, enthalten sind (hohe Konzentration an Metallen, einfache mechanische Verarbeitbarkeit). In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind Beispiele für Rückstände aus dem Haloclean-Prozess angeführt (KOCH, 2007).



Abbildung 27: Zerkleinerte Leiterplatten und Rückstände nach zweistufiger Pyrolyse (KOCH, 2007)

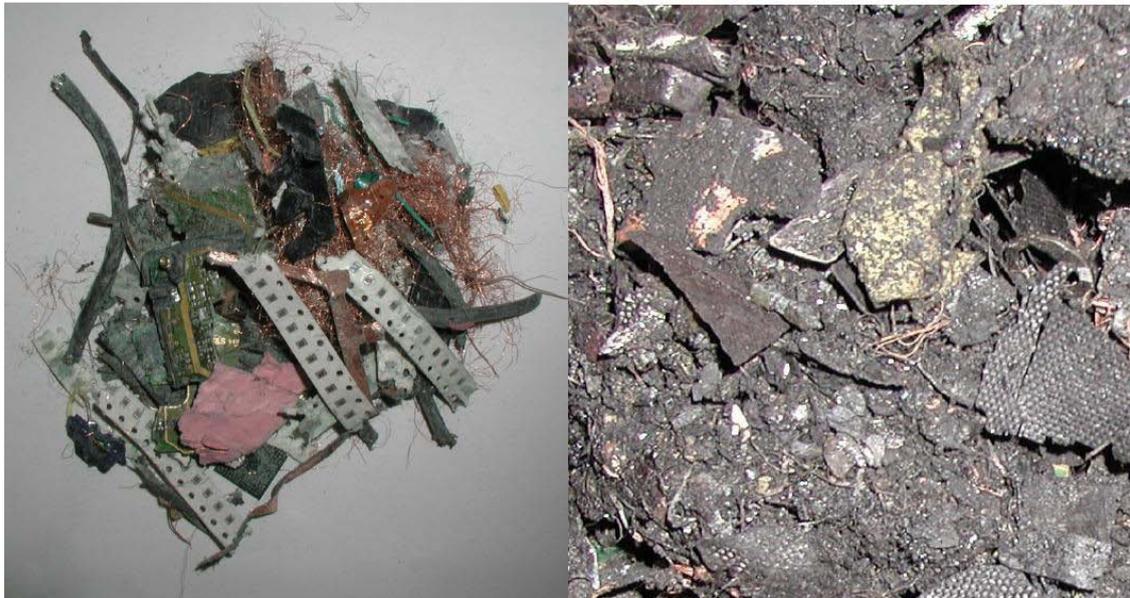


Abbildung 28: Zerkleinerte Mobiltelefone und Rückstände nach zweistufiger Pyrolyse (KOCH, 2007)

Die Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, Elektroaltgeräte pyrolytisch in Öl und Gas zu fraktionieren, unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen wie zum Beispiel Temperatur und Verweilzeit. Am Ende dieses Verfahrens liegen dann Brom und andere Halogene vor, sowie ein Rückstand (KOCH, 2007).

Diese Untersuchungen wurden vorerst nur im Labormaßstab durchgeführt, dienen aber als Grundlage für die Auslegung einer Anlage, die nach diesem Prinzip arbeiten soll. Vorgesehene Anlagenleistung war 6000 Tonnen Elektroschrott pro Jahr bei Investitionskosten von in etwa drei Millionen Euro. Erstaunlicherweise gibt KOCH (2007) an, dass bis zu einer praktischen Umsetzung noch Forschungsbedarf

besteht. Es konnten bei der Recherche auch keine Hinweise darauf gefunden werden, dass dieses Verfahren mittlerweile im praktischen Einsatz ist.

Viele weitere Forschungsaktivitäten laufen, um den Gesamtprozess zu verbessern, so setzen MAURELL-LOPEZ et al. (2012) zum Beispiel beim Energieverbrauch an, und zeigen Verfahren auf, mit denen ein autothermes Einschmelzen möglich ist. Das bedeutet, dass bei diesem Verfahren die in den Elektroaltgeräten enthaltenen organischen Stoffe den kompletten Energiebedarf, der für die Verbrennung notwendig ist, liefern.

In Bezug auf pyrometallurgische Verfahren für Elektroaltgeräte kann zusammenfassend festgestellt werden, dass ausgereifte Technologien zur Verfügung stehen, aber auch, dass sie in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt wurden und immer noch werden. Die aktuellen Anlagenkapazitäten in Europa sind ausreichend und werden weiter ausgebaut. Als noch ausbaufähig werden vorgelagerte Prozesse angegeben, wie zum Beispiel die Erfassung der Elektroaltgeräte beziehungsweise einzelner Komponenten und die jeweiligen Vorbehandlungsschritte wie zum Beispiel Demontage. Hier sind noch Weiterentwicklungen und Innovationen notwendig (LANUV, 2011).

3.3.3 Biometallurgie

Eine der neuesten Methoden zur Rückgewinnung von Metallen aus Elektroaltgeräten ist die Biometallurgie. Während dieses Verfahren an sich in der Metallrückgewinnung schon länger eingesetzt wird, ist der Einsatz im Recycling anderer Materialien noch Neuland und wird von mehreren Seiten als vielversprechende Technologie gesehen (LUDA, 2011 und SOHAILI et al., 2012). Im Vergleich zu den anderen Methoden werden folgende Vorteile gesehen, wie zum Beispiel geringere Betriebskosten, geringere Mengen von chemischen beziehungsweise biologischen Rückständen (zum Beispiel belastete Schlämme) und dadurch geringere Umweltauswirkungen (HUANG et al., 2009).

Grundprinzip ist, dass spezielle Mikroben die Fähigkeit haben, metallische Ionen aus der Umgebung an ihrer Zelloberfläche zu binden oder diese in die Zelle einzubauen. Zwei Verfahren können hierbei unterschieden werden, einerseits Biolaugung und andererseits Biosorption. Bezüglich Biolaugung ist bekannt, dass erfolgreich nachgewiesen wurde, dass in einem Fall Gold aus Leiterplatten gelöst werden kann und in dem anderen Fall Kupfer (LUDA, 2011).

Forschungsaktivitäten zur Rückgewinnung von weiteren Metallen wie zum Beispiel Kupfer, Zink und Eisen sind im Gange und scheinen erfolgversprechend zu sein, wobei auch erste Experimente mit Edelmetallen durchgeführt wurden, die als vielversprechende Anwendung in der nahen Zukunft gesehen werden (PRADHAN und KUMAR, 2012).

4. Systemübergreifende Innovationen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle Projekte aus dem europäischen Umfeld, die sich mit systemischen- und prozessorientierten Innovationen beschäftigen, also Innovationen die sich nicht auf die Verbesserung und Weiterentwicklung eines speziellen Verfahrens konzentrieren, sondern auf die Weiterentwicklung der Prozesskette zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten.

4.1 Projekt SATURN

In dem Projekt SATURN (Sensor-sorting Automated Technology for advanced Recovery of Non-ferrous metals) wurden neuartige Technologien zur Detektion von Nichteisenmetallen in Abfall vorgestellt. Start des Projekts war im August 2009. Durchgeführt wurden die Tests in Salzgitter (Deutschland). Projektpartner waren das Institut für Aufbereitung und Recycling der RWTH Aachen, Mekon Metallkonzentrat und Recycling GmbH, TITECH GmbH, pbo Ingenieures. mbH und Envirolink Northwest.

Ziel war es, einen innovativen Sortierprozess unter realen Bedingungen zu testen und zu optimieren. Um das zu erreichen, sollte Folgendes umgesetzt werden:

- Aufbau einer Pilotanlage, die in der Lage ist, Produkte aus Nichteisenmetallen in hoher Reinheit zu liefern
- Verbesserung der Prozesskette des Abfallrecyclings in Europa
- Optimierung der Energieeffizienz in der Herstellung von Produkten aus Nichteisenmetallen
- Berücksichtigung der nachhaltigen Entwicklung beziehungsweise des nachhaltigen Umwelt- und Ressourcenmanagements

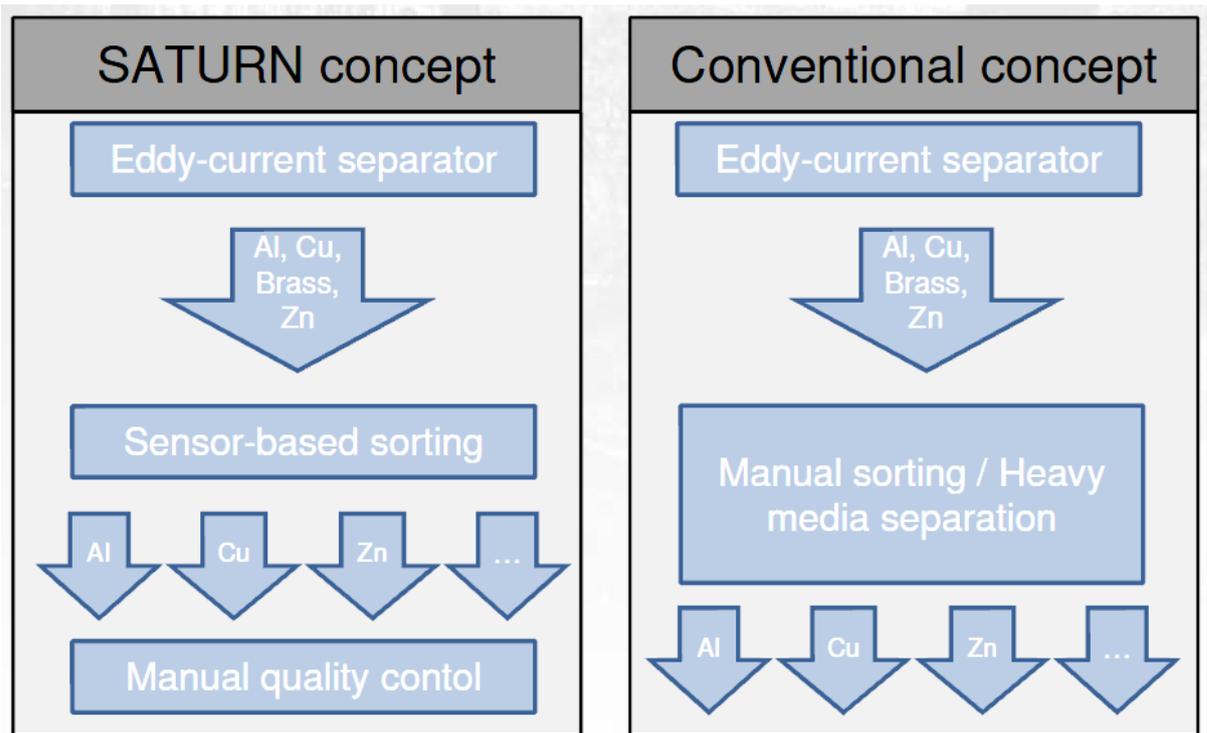


Abbildung 29: Systemskizze Projekt SATURN (SATURN, 2012)

Die grundlegende Entwicklung in diesem Projekt war, den Schritt der manuellen Sortierung von Nichteisenmetallen mittels sensorbasierten Sortierverfahren zu automatisieren (siehe Abbildung 29). Im April 2012 wurden die Ergebnisse des Projektes präsentiert, demzufolge konnten 98,4% des Aluminiumverbundmaterials, der Aluminiumprofile, des Kupfers, des Messings und des Zinks, das in dem Ausgangsmaterial vorhanden war, in den Testläufen zurückgewonnen werden.

Im Projekt durchgeführte Berechnungen haben gezeigt, dass die Nutzung der wiedergewonnenen Materialien vier Mal weniger CO₂ Emissionen (in CO₂-Äquivalenten) verursacht hat, als die Nutzung neuer Rohstoffe. Bei jetzigen Marktbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass der ökonomische Break-Even-Punkt bei einem Jahresdurchsatz zwischen ungefähr 2600 Tonnen und 8000 Tonnen erreicht werden kann, abhängig vom Ausgangsmaterial und eventuellen speziellen Bedingungen vor Ort. Die Projektpartner gehen davon aus, dass dieses Verfahren nicht für alle Anlagen wirtschaftlich durchführbar ist, sondern nur für große, zentralisierte Anlagen (SATURN, 2012).

4.2 Projekt WEEE TRACE

Das Projekt WEEE TRACE zielt darauf ab den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien, insbesondere RFID (radio-frequenzy identification) oder Bilderfassung, speziell für die Behandlung von Elektroaltgeräten zu untersuchen. Damit soll eine „Cradle-to-Grave“ Verfolgung, also eine örtliche Verfolgung jedes Geräts entlang des kompletten Lebenszyklus ermöglicht werden. Außerdem soll so die Sammelquote erhöht werden, wie es auch in der WEEE-Richtlinie gefordert wird. Weiter soll mit dieser Technologie garantiert werden, dass die Abfälle in die jeweils richtige Abfallbehandlungsanlage kommen, womit auch illegale Exporte von EAG minimiert werden können. Zusätzlich könnten durch die zuverlässige Identifikation des Abfalls in den Behandlungsanlagen die gefährlichen Substanzen, die in den Geräten sind, erkannt werden und die Betriebskosten durch Optimierung in der Logistik reduziert werden. Schlussendlich ist vorgesehen, dass die Erkenntnisse auch in anderen europäischen Systemen zur Behandlung von Elektroaltgeräten oder in anderen Abfallsammelsystemen eingesetzt werden sollen.

Das Projekt wurde im Juli 2011 gestartet und läuft bis Juli 2014. Projektpartner sind mcctelecom, Fundacion Ecolec, Asekol, Fagor Electrodomésticos, Fane-Eointegra, Sigrauto, Cega Logistics, Carrefour Espana und Berziklatu. Eine Umsetzung im Rahmen von Pilotversuchen findet an Standorten in Spanien und der Tschechischen Republik statt.

Als Ergebnis soll ein neuartiges System zur Verfolgung von Elektroaltgeräten oder Behältern (zum Beispiel Container) vorliegen. Mit diesem bieten sich folgende Möglichkeiten:

- Identifikation des Herstellers und somit die Möglichkeit, diesen direkt zu kontaktieren, wenn es um Fragen der Produkthaftung geht
- Möglichkeit das Alter des Elektroaltgerätes zu bestimmen
- Möglichkeit gefährliche Stoffe frühzeitig zu erkennen

Dies soll automatisiert erfolgen und die Informationen sollen dem Betreiber in Echtzeit bereitgestellt werden.

Umgesetzt werden soll dies durch eine lückenlose Nachverfolgung von Elektroaltgeräten von der Sammlung bis zur Behandlung in der sogenannten „WEEE Management Chain“. In dem Projekt besteht diese Kette aus 80 Sammelstellen, 15 Logistikunternehmen und 40 Abfallbehandlungsanlagen. Bisher wurden Versuche mit optischen Erkennungssystemen durchgeführt, die unter anderem darauf abzielen, das Logo des Herstellers eines Elektroaltgerätes zu erkennen (siehe Abbildung 30). Hierbei liegen schon Erfahrungswerte vor, anhand denen eine Erkennungsrate von ca. 91,8% möglich ist, allerdings bezogen auf die Produktgruppe der Bildschirmgeräte. Weitere Identifikationsmöglichkeiten sind Angaben auf dem Typenschild des jeweiligen Geräts (zum Beispiel Modellnummer) oder der Barcode.



Abbildung 30: Optische Erkennung eines Logos (REDONDO und FISER, 2012)

Weitere Tests mit RFID Lesegeräten und Transpondern zeigen, dass in diesen Bereichen noch Probleme vorhanden und Verbesserungen erforderlich sind:

- Fehlermessungen durch RFID Lesegeräte
- Schlechte Lesbarkeit des Transponders, beziehungsweise völliges Fehlen des Transponders (zum Beispiel weil er sich aufgrund der Umweltbedingungen abgelöst hat)
- Fehlende Norm für die Datenübertragung

Weitere Tests sind am Laufen. Die vollständigen Ergebnisse und Erkenntnisse sind am Ende der Projektlaufzeit, im Juli 2014, zu erwarten (WEEE TRACE, 2012).

4.3 Projekt E-AIMS

Mit dem Projekt E-AIMS (Automatic and Individualised Sorting and Management Processes of e-Wastes) soll den Abfallbehandlern ein optimaler Prozess für die energieeffiziente, automatische und individualisierte Sortierung und Behandlung von Elektroaltgeräten bereitgestellt werden. Zur Erreichung dieses Ziels wird die technische und ökonomische Machbarkeit der eingesetzten Technologien in einer maßstabsgetreuen Anlage im Echtbetrieb demonstriert. Das Projekt startete im September 2009 und soll im September 2013 abgeschlossen sein. Projektpartner sind Inkoa Sistemas, Indumetal Recycling, Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik und Electro-Coord.

Die vorgeschlagene Lösung ist eine innovative Sortiertechnologie kombiniert mit einem innovativen Organisationskonzept für alle Kategorien von Elektroaltgeräten, basierend auf automatisierten Systemen, Softwareanwendungen und RFID-Identifikationssystemen.

Die Lösung erlaubt ein automatisches Sortieren und eine individuelle Behandlung der Elektroaltgeräte einerseits anhand der Daten, die im jeweiligen Gerät mittels RFID hinterlegt sind (Daten des jeweiligen Produzenten, Gefahrstoffe, Materialzusammensetzung, Demontageanweisungen), und andererseits anhand der Kriterien, die zuvor von den betroffenen Stellen (zum Beispiel Abfallbehandler), die für die Behandlung der Elektroaltgeräte verantwortlich sind, definiert wurden. In der folgenden Abbildung ist das Gesamtkonzept schematisch dargestellt.

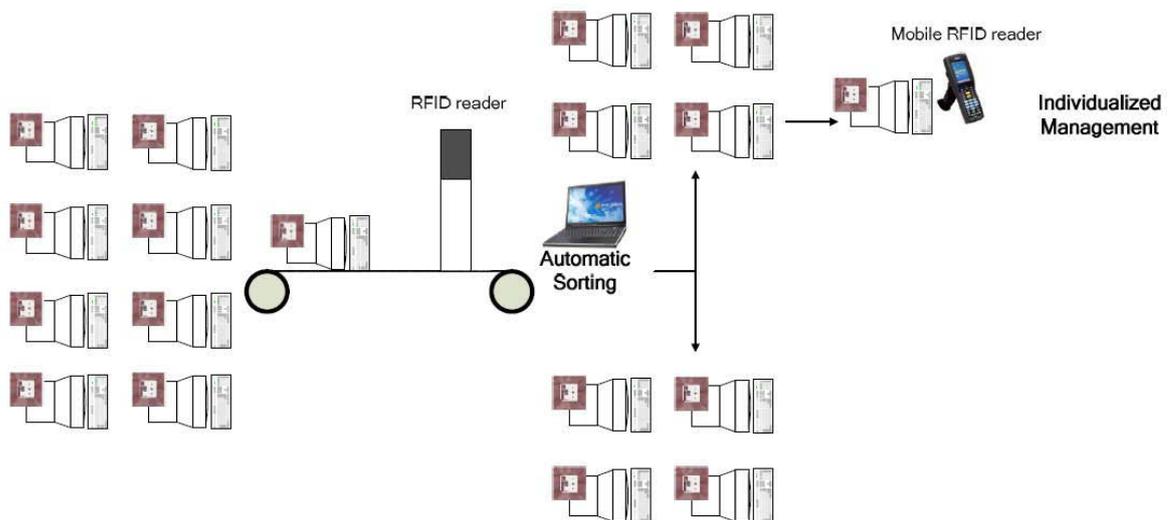


Abbildung 31: Schema Projekt E-AIMS (E-AIMS, 2012)

Die Ergebnisse aus diesem Projekt sollen dazu beitragen, die ambitionierten Vorgaben aus der Richtlinie 2002/96/EC bezüglich Sammlung, Recycling, Wiederverwendung und Verwertung zu erreichen. Im Vergleich zum Ist-Stand sollen die Technologien und Verfahren, die in diesem Projekt entwickelt werden, zu folgenden Verbesserungen führen:

- Erhöhung der stofflichen Verwertung
- Erhöhung der Rückgewinnungsraten
- Verringerung der zu deponierenden Abfallmengen
- Reduzierung des Energieverbrauchs (E-AIMS, 2012)

Die ersten Erfahrungen aus dem Projekt zeigen, dass folgende Bereiche noch genauer zu untersuchen sind:

- Position des Transponders: Einerseits soll der Transponder so angebracht werden, dass er einfach ausgelesen werden kann, also beispielsweise außen. Allerdings ist der Transponder dann äußeren Einflüssen ausgesetzt und kann zerstört oder abgetrennt werden. Eine andere Möglichkeit wäre, den Transponder im Inneren des Geräts anzubringen. Das setzt allerdings voraus, dass dieser nur in einem Bereich angebracht wird, in dem er nicht durch eine metallische Fläche abgeschirmt wird. Diese Randbedingungen wären dann vom jeweiligen Hersteller zu berücksichtigen. Neben den Problemen mit der Abschirmung können bei der Anbringung im Innenbereich auch noch Platzprobleme hinzukommen. Bei der Anbringung außen kommen noch Fragen des Designs hinzu.
- Notwendige Information auf dem Transponder: Die Art und Menge der Informationen, die auf dem Transponder hinterlegt sind, sind ein wesentliches Qualitätskriterium für diese vorgeschlagene Methode. Im Laufe des Projekts hat sich allerdings herausgestellt, dass Hersteller, die vor Beginn des Projekts wegen Unterstützung angefragt wurden, diese zwar zugesagt haben, aber während der Projektlaufzeit nur spärlich Informationen zu den einzelnen Produkten übermittelten. Die Projektpartner gehen aber davon aus, dass die notwendigen Informationen doch noch geliefert werden (E-AIMS, 2012).

Beide Erkenntnisse zeigen, dass neben den technischen Fragen vor allem noch organisatorische Fragestellungen zu klären sind. Insbesondere die Rolle der Hersteller muss mit diesen noch geklärt werden, wobei neben den oben angeführten Punkten auch Fragen, wie zum Beispiel wer die Mehrkosten, die bei einer Bestückung jedes Geräts anfallen, zu tragen hat.

4.4 Projekt REWARD

Mit dem Projekt REWARD (Recovery of Electronic Waste through Advanced Recycling and Demonstration) soll aufgezeigt werden, dass eine Optimierung der Wiederverwendung, Recycling und Verwertung möglich ist und zwar durch eine bessere Zerkleinerung und Sortierung und durch den Einsatz sensorgestützter Trennverfahren. Die Demonstration findet bei Herstellern, in Forschungseinrichtungen und auf Anlagen der Abfallbehandler statt. Laufzeit des Projekts ist von September 2009 bis Juli 2012. Projektpartner sind Recycling Consult, Dolphin Metal Separation, PHB-Recycling und BRGM.

Der Schlüssel dieses Projekts ist die Demonstration der verbesserten Erfassung, der Sortierung und der diagnostischen Technologien, um Sekundärmaterial von hoher Qualität zu produzieren. Mithilfe einer prototypischen Anlage sollen unter realen Bedingungen die folgenden zwölf Prozesse durchlaufen werden. Diese Prozesse sind größtenteils bisher nur im Labormaßstab eingesetzt worden.

- Grobzerkleinerung für eine verbesserte Aufschließung und Trennung
- Metalldetektion für die Sortierung und die Trennung von Metallen
- Magnetische Trennung der magnetischen (Stahl, Eisen), schwach magnetischen (rostfreie Stähle) und stark magnetischen Materialien (Magnete, Keramik)
- Wirbelstromtrennung für leitfähige, nicht-magnetische Metalle
- Erweiterte Dichtentrennung für Polymere und Metalle
- Elektro-magnetische Sortierung für nicht-magnetischen Edelstahl
- Röntgenfluoreszenz für die Trennung von ferromagnetischen Metallen und Kupferspulen
- Farbsensorsortierung für die Trennung von farbigen Metallen und Polymeren
- Röntgensortierung für die Trennung von halogenierten Polymeren
- Dichtentrennung zur Abspaltung von leichten Kunststoffen aus schweren Kunststoffen
- Nahinfrarotspektroskopie für Trennung von Polymeren
- Farbsortierung zur Trennung von grauem und schwarzen Kunststoff

Diese Technologien sind bisher noch nicht in dieser Folge demonstriert worden. Mit dieser Demonstrationsanlage sollen 18 verschiedene Fraktionen mit hoher Reinheit erzeugt werden, die sich für ein anschließendes Recycling eignen. Es wird davon

ausgegangen, dass mit diesem Verfahren Recyclingquoten von bis zu 40% erreicht werden können und eine Verwertung von bis zu 90% (bezogen auf das Volumen). Begleitend dazu werden auch umfassende Lebenszyklusanalysen durchgeführt, um die nachhaltige Verbesserung dieses Verfahrens zu quantifizieren. Das Ergebnis soll ein Entwurf für eine vollwertige Anlage zur Behandlung von Elektroaltgeräten auf Basis der Erfahrungen der Demonstrationsanlage sein (REWARD, 2012).

Bisher wurden zwei verschiedene Tests, die innerhalb dieses Projekts durchgeführt wurden, dokumentiert und sind öffentlich zugänglich. Zum einen wurde eine Testreihe mit Kunststoffgehäusen von Flachbildschirmen durchgeführt. Diese enthalten zum Teil Flammenschutzmittel. Ziel war es, die unterschiedlichen Kunststoffe, die in den verschiedenen Flachbildschirmen enthalten sind, zu detektieren und zu trennen und somit auch die Kunststoffe, die die Flammenschutzmittel enthalten, abzutrennen. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Kunststoffe, die am häufigsten eingesetzt werden, HIPS (High Impact Polystyrene) und PC/ABS (Mischung aus Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol) mit einer Kombination verschiedener Verfahren getrennt werden können. Allerdings ist die Durchführung dieses kombinierten Verfahrens sehr kostenintensiv (Tange et al., 2012).

In dem anderen publizierten Test wurden anhand zweier verschiedener Samples aus verschiedenen Recyclingbetrieben Versuche durchgeführt. Das erste Sample enthielt verschiedene Arten von Kunststoffen, Metalle, Leiterplatten, Gummi und Holz. Das zweite Sample enthielt hauptsächlich verschiedenste Arten von Kunststoffen. Es wurden dabei folgende Verfahren nach dem Schreddern eingesetzt: Trennung in drei verschiedene Größen, optische Identifikation (zum Beispiel nach Farbe), Identifikation des Materials (insbesondere des Kunststoffs) und die Abtrennung der Eisen- und Nichteisenmetalle. Die Ergebnisse zeigen gute Erfolge bei der Trennung in unterschiedliche Fraktionen und sollen die Basis für ein allgemeines Ablaufdiagramm für die Trennung von Kunststoffen aus WEEE sein (MENAD et al., 2012).

4.5 Projekt Poly-Ressource

Ziel dieses Projekts ist es, hochwertige Kunststoffspritzgussteile aus Schredderrückständen herzustellen, insbesondere aus Rückständen von EAG. Es basiert somit auf dem CreaSolv-Prozess, der vom Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV und der Firma Crea CYCLE GmbH entwickelt wurde. Mit diesem Prozess ist es möglich, stark schadstoffbelastete Kunststoffe rohstofflich zu verwerten (zum Beispiel belastet mit Schwermetallpigmenten und halogenierten Flammenschutzmittel). Der gewünschte Kunststoff wird aus dem Abfall abgetrennt (durch Lösung, Reinigung, Fällung und Trocknung), wobei Fremdmaterialien, wie unerwünschte Additive, zum Beispiel Flammenschutzmittel, und deren toxische Zerfallsprodukte abgetrennt werden (siehe Abbildung 32). Flammenschutzmittel bestehen zum größten Teil aus bromierten chemischen Verbindungen. Diese können im Brandfall, teilweise sogar schon bei der Herstellung der Bauteile mittels Extrusion, zu hochtoxischen Verbindungen,

polybromierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PBDD/F) führen. Für diese PBDD/F gelten strenge Grenzwerte, die bei Rezyklaten eingehalten werden müssen (FRAUNHOFER, 2012b). Damit können insbesondere Kunststoffe aus Elektroaltgeräten und Altautos recycelt werden, die bis dato aufgrund der hohen Anteile dieser Fremdmaterialien nicht verwertbar waren und thermisch entsorgt werden mussten (KOCH, 2007).

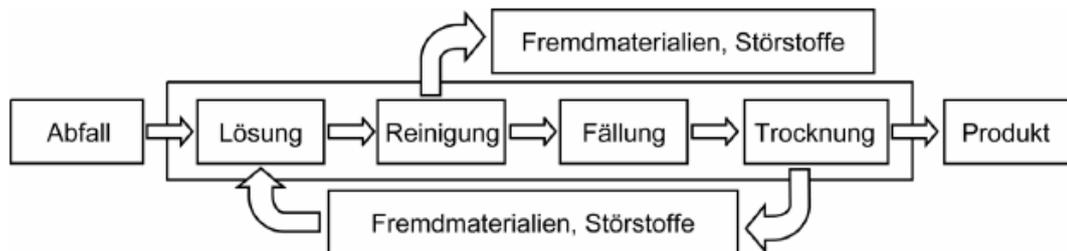


Abbildung 32: CreaSolv-Prozess (KOCH, 2007)

Kern dieses Konzepts ist die Verbindung des CreaSolv-Prozesses mit einer anschließenden polymertechnischen Veredelung mit optimierter Trocknung. Als Ergebnis sollen dann hochwertige Produkte vorliegen, die als Ausgangsmaterial für Spritzgussprodukte in Elektroaltgeräten und Neufahrzeugen verwendet werden können. Zunächst sollen die Einzelprozesse im kleineren Maßstab aufeinander abgestimmt werden und dann anschließend im größeren Maßstab unter industriellen Bedingungen, wobei auch Untersuchungen und Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit durchgeführt werden. Für den CreaSolv-Prozess wird eine Pilotanlage errichtet, bei der davon ausgegangen wird, dass die Produkte die damit gewonnen werden, eine siebenfach bessere Energieeffizienz aufweisen als neue Produkte die aus Erdöl hergestellt wurden. Somit könnte eine Reduktion des Energieaufwands um 85% erreicht werden.

Zusätzlich sollen neben der Gewinnung der technischen Kunststoffprodukte aus Schredderleichtfraktionen auch vorgelagerte Prozesse, wie zum Beispiel die Erfassung und Aufarbeitung der Altkunststoffe, mit betrachtet werden.

Dieses im Programm „KMU-innovativ“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung in Deutschland geförderte Verbundprojekt läuft von 2010 bis 2012 (FRAUNHOFER, 2012a).

4.6 Projekt MoveRec

Im Projekt „MoveRec – Materialstrombasierte Optimierung von Verfahrensketten“ wurde ein kostengünstiges Tool entwickelt, das unter anderem bei der Planung und Optimierung von Recyclinganlagen eingesetzt werden kann. Damit sollen zukünftig teure Versuche eingespart oder sogar vermieden werden.

Dazu soll einerseits die Materialzusammensetzung der Inputströme erhoben und erfasst werden. Auf der anderen Seite werden bestehende Verfahren analysiert und charakterisiert. Durch eine Stoffstromanalyse werden diese beiden Datenquellen verknüpft und es können daraus unterschiedliche Verfahrensvarianten modelliert und auch wirtschaftlich bewertet werden. Dies soll bei Neu- oder Umbauten von Recyclinganlagen dazu beitragen, auf teure Versuche zu verzichten, oder diese zumindest einzuschränken.

Folgende Punkte sollten umgesetzt werden (KERP, 2012):

- Aufbau einer datenbankbasierten Methodik zur Bestimmung der Materialzusammensetzung von Elektroaltgeräten nach Sammelkategorien variabler Gerätezusammensetzungen
- Systematische Beschreibung und numerische Abbildung der relevanten Prozesse im Bereich Sammlung/Aufbereitung und Verwertung von Elektroaltgeräten und Altfahrzeugen
- Verknüpfung input- u. prozessbezogener Datensammlungen mittels Stoffstromanalyse
- Entwicklung eines produktqualitäts- und marktabhängigen Bewertungsschemas für Sekundärrohstoffe aus der WEEE-Aufbereitung
- Ausarbeitung eines auf dem Bewertungsschema basierenden Ausgabereportings und einer Verfahrensbewertung zur Ableitung von Optimierungspotentialen beziehungsweise Identifizierung optimaler Verfahrensketten
- Validierung der entwickelten Methoden und Daten

Als Ergebnis des Projekts liegt eine Datensystematik vor, mit der alle relevanten WEEE-Recyclingprozesse erfasst wurden. Weiter ist es möglich, die durchschnittliche Materialzusammensetzung beziehungsweise Bauteilzusammensetzung gewählter Elektrokleingeräte zu ermitteln. Außerdem soll eine Abschätzung der Materialzusammensetzung komplexer Bauteile (zum Beispiel Laserdrucker) möglich sein (LEITNER, 2012).

Daraus ergeben sich folgende potentielle Anwendungsfälle:

- Abschätzung der Materialzusammensetzung von Teilinputströmen als Input für Anlagenbetreiber
- Prognosen über zu erwartende Outputzusammensetzungen und zu erwartende Materialerlöse/Entsorgungskosten bei unterschiedlichen Inputzusammensetzungen als Input bei Anlagenneuerrichtungen
- Gezielte Identifizierung besonders wertvoller Materialien und Substanzen (Seltene Erden) zum Beispiel bei der Erstellung regionaler Stoffstrombilanzen (LEITNER, 2012)

Das Projekt wurde von KERP - Kompetenzzentrum Elektronik & Umwelt GmbH durchgeführt.

4.7 Projekt MORE

In dem Verbundprojekt, das vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde, ist das Ziel die Entwicklung einer Lösung zur Wiederverwendung und –verwertung von Materialien aus Elektromotoren von Elektrofahrzeugen, insbesondere der in den Magneten verwendeten Metalle der seltenen Erden (zum Beispiel Neodym). Für kompakte und leichte Synchronmotoren werden Permanentmagnete mit einem Anteil von etwa 30 Prozent an Seltenerdmetallen benötigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es in Zukunft zu einer erhöhten Produktion von Elektro- und Hybridfahrzeugen kommen wird, und somit der Bedarf an Metallen der seltenen Erden dramatisch ansteigen wird. Darüber hinaus wird angenommen, dass auch in anderen Bereichen künftig mehr dieser Materialien für Magneten benötigt werden, zum Beispiel in Generatoren von Windkraftanlagen. Eine Konsequenz daraus wäre eine extreme Preissteigerung für diese Materialien, die zu Standortnachteilen in Europa führen könnten. Um dem entgegen zu wirken, sollen die in den Magnetwerkstoffen enthaltenen wertvollen Materialien daher zukünftig verstärkt zurückgewonnen werden.

In dem Projekt sollen verschiedene Ansätze untersucht werden, wie

- Ausbau der Magnete aus den Altmotoren
- Reparatur und anschließende Wiederverwendung des Elektromotors
- Werk- und rohstoffliche Wiederverwertung der Magnetmaterialien durch Wiedergewinnung aus vorsortiertem und geschreddertem Material
- Erstellen von Konzepten für ein recyclinggerechtes Motordesign
- Erstellen von Ökoeffizienzanalysen
- Erarbeitung von Modellen für Stoffkreisläufe

Bezüglich der Wiedergewinnung der Metalle der seltenen Erden ist geplant, Prozesse zur mechanischen Aufbereitung von Motorschrott, Prozesse zur Gewinnung seltener Erden durch hydrometallurgische Verfahren, sowie Prozesse zur Rückgewinnung seltener Erden aus Schlacken und Flugstäuben, die aus vorgeschalteten pyrometallurgischen Prozessen anfallen, zu entwickeln. An dem Projekt sind beteiligt: Siemens AG, Daimler AG, Umicore AG & Co. KG, Vacuumschmelze GmbH & Co.KG, Universität Erlangen-Nürnberg, TU Clausthal, Fraunhofer ISI, Öko-Institut e. V. (BAST et al., 2012).

Das Projekt startete im Mai 2011 und läuft bis April 2014. Bis dato wurden noch keine Zwischenergebnisse publiziert.

5. Bewertung der Verfahren

Zur Bewertung der Technologien wurde auf die Methode der Technologie-Portfolio-Analyse zurückgegriffen, die zu einer systematischen Bewertung neuer Technologien eingesetzt werden kann. Diese wurde Ende der 70er Jahre von der Forschungsgruppe für Innovation und technologische Voraussage (FIV) Nürnberg am Lehrstuhl für Industriebetriebslehre des Fachbereichs Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg unter der Leitung von Werner Pfeifer entwickelt und ist seither ein etabliertes Instrument im Innovationsmanagement. Die Grundidee ist eine Bewertung in drei Schritten: Technologieidentifikation, zukunftsorientierte Technologiebewertung und Auswertung des Technologieportfolios.

In der vorliegenden Arbeit soll zunächst überprüft werden, ob diese Methode für diesen Anwendungsfall prinzipiell angewendet werden kann, weshalb die Bewertung vom Autor selbst, auf Basis der vorhandenen Daten, durchgeführt wurde. Aus diesen Erfahrungen werden dann als Schlussfolgerungen Empfehlungen für die weitere Durchführung dieser Methode abgegeben.

5.1 Technologieidentifikation

Der erste Schritt, die Technologieidentifikation, entspricht den Erkenntnissen aus Kapitel 3 und Kapitel 4. Der zweite Schritt, die zukunftsorientierte Technologiebewertung, soll in diesem Kapitel durchgeführt werden. Der dritte Schritt soll, wie im Folgenden noch genauer erläutert, nur ansatzweise durchgeführt und demonstriert werden.

Schwerpunkt in dieser Arbeit liegt auf der Durchführung der zukunftsorientierten Technologieidentifikation. Hierbei werden die Technologien bezüglich zweier Größen bewertet, einerseits in Bezug auf die Technologieattraktivität und andererseits auf die Ressourcenstärke.

5.2 Technologieattraktivität

Die Technologieattraktivität ist hier definiert als Summe aller Vorteile, die sich durch das Ausnutzen der strategischen Weiterentwicklungsmöglichkeiten einer Technologie ergeben. Dazu werden drei Indikatoren benutzt, das Weiterentwicklungspotential, die Anwendungsbreite und die Kompatibilität. Am Ende steht dann eine Bewertung der Technologieattraktivität in einer fünfstufigen Skala: 0=sehr niedrig, 1=niedrig, 2=mittel, 3=hoch, 4=sehr hoch. In dieser Arbeit sollen nun auch die einzelnen Indikatoren mittels dieser Bewertungen eingestuft werden, wobei der Mittelwert dann die Bewertung für die Technologieattraktivität darstellt.

Folgende Definitionen gelten dabei für die jeweiligen Indikatoren:

- Weiterentwicklungspotential: In welchem Umfang ist eine technische Weiterentwicklung und damit Leistungssteigerung möglich?
- Anwendungsbreite: Wie sind die Anzahl möglicher Einsatzbereiche der Technologie einzuschätzen? Als Indikator wird hier die Gerätekategorie verwendet.
- Kompatibilität: In dieser Bewertung bedeutet eine positive Kompatibilität, dass das Verfahren optimal in die gesamte Prozesskette (siehe Kapitel 3.1) eingebunden werden kann. Im Gegensatz dazu wäre eine negative Kompatibilität dann gegeben, wenn das Verfahren überhaupt nicht in eine Prozesskette eingebunden werden kann. Für eine vergleichbare Bewertung wurden für diesen Indikator folgende Einstufungen verwendet: 0=sehr negativ, 1=negativ, 2=neutral, 3=positiv, 4=sehr positiv (VAHS und BURMESTER, 2005).

Verfahren	Weiterentwicklungspotential	Anwendungsbreite	Kompatibilität	Technologieattraktivität
IC-Verfahren	2	1	3	2
Magnetscheider	1	4	3	2,7
Wirbelstromscheider	1	4	3	2,7
Schredder-Sand-Verfahren	3	3	2	2,7

Tabelle 1: Technologieattraktivität – Direkte Sortierverfahren

Weiterentwicklungspotential – Indikator Leistungssteigerung:

Das **IC-Verfahren** wird in Bezug auf das Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass nach der erfolgreichen Etablierung des Verfahrens als nächster Schritt eine weitere Optimierung angestrebt wird. Im Moment verspricht der Hersteller, dass 150 Kühlgeräte pro Stunde bearbeitet werden können. Prinzipiell vergleichbare Anlagen versprechen zum Beispiel 300.000 Geräte pro Jahr, bzw. 1000 Kühlgeräte täglich, was bei acht Stunden in etwa 125 Geräte pro Stunde entspricht (UHF RECYCLING, 2013), oder in einem anderen Fall 250.000 Geräte pro Jahr (ZAUG RECYCLING, 2013), was, wenn man

zu Vergleichszwecken die Daten mit den obigen ins Verhältnis setzt 104 Geräte pro Stunde ergibt. In Bezug auf die Leistungsfähigkeit ist das IC-Verfahren somit schon besser als vergleichbare Anlagen, woraus gefolgert wird, dass keine großen Leistungssprünge mehr möglich sind, aber vermutlich dennoch ein gewisses Maß an Optimierungspotential vorhanden ist.

Die **Magnetscheider** sind bewährte und in der Praxis lange erprobte Verfahren. Bezüglich Weiterentwicklung wurden folgende Trends beobachtet: Reduktion des Energieverbrauchs, Erhöhung der magnetischen Energiedichte (vor allem durch Neodymmagneten) und Optimierung des Gesamtsystems (z.B. Anpassung der Arbeitsbreite, optimierte Anordnung des Magneten). Mit diesen Verbesserungen konnte die Leistung kontinuierlich gesteigert werden, wobei die Fortschritte eher inkrementell einzustufen sind. Da in diesem Bereich keine großartig neuen Entwicklungen zu erwarten sind und die Hersteller in nächster Zeit eher damit beschäftigt sein werden, ein Ersatz für Neodym zu finden, sind hier keine großartigen Weiterentwicklungen zu erwarten. Daher wird das Weiterentwicklungspotential mit niedrig (1) bewertet

Da **Wirbelstromscheider** vom Prinzip her den Magnetscheidern sehr ähnlich sind, werden hier die Annahmen übernommen, womit auch diese mit niedrig (1) bewertet werden.

Die Entwickler des **Schredder-Sand Verfahrens** gehen davon aus, dass mit diesem im Schnitt 65% der Gesamtmenge des Schredder-Sandes verwertet werden kann (DUWE und GOLDMANN, 2012). Dies ist das Ergebnis der ersten Entwicklungen und gilt für die Fraktion < 1 mm. Die Autoren geben noch ein weiteres Potential bei der Aufbereitung von Schredder-Sanden an bei der Fraktion > 1 mm. Eine mögliche Weiterentwicklung zur Steigerung der Leistungsfähigkeit ist also schon in Aussicht gestellt. Daher wird das Weiterentwicklungspotential dieses Verfahrens mit hoch (3) bewertet.

Anwendungsbreite – Indikator Gerätekategorien:

Das **IC-Verfahren** ist speziell für die Behandlung von Kühlgeräten entwickelt worden und wird auch zukünftig auf diese Gerätekategorie beschränkt bleiben. Daher wird die Anwendungsbreite mit niedrig (1) bewertet.

Magnetscheider können bei der Behandlung von nahezu allen Gerätekategorien eingesetzt werden, von Kleingeräten über Bildschirmen bis hin zur Behandlung von Batterien (TESAR und ÖHLINGER, 2009), daher wird die Anwendungsbreite mit sehr hoch (4) bewertet.

Für **Wirbelstromscheider** gelten wieder dieselben Annahmen wie für Magnetscheider, womit auch hier die Bewertung sehr hoch (4) gilt.

Das **Schredder-Sand Verfahren** ist im Umfeld des Fahrzeugrecyclings entwickelt worden. In der Entwicklung wurde aber auch mit Sanden gearbeitet, die aus

Rückständen verschiedener anderer Inputmaterialien entstanden sind, wie zum Beispiel Baustähle und leichter Mischschrott, sowie weiße Ware (DUWE und GOLDMANN, 2012). Daraus kann abgeleitet werden, dass die Anwendungsbreite über Fahrzeuge hinaus geht und dieses Verfahren zumindest auch für Sande eingesetzt werden kann, die aus den Kategorien Großgeräte, Elektrokleingeräte und teilweise auch Kühl- und Gefriergeräte stammen, womit dieses Verfahren mit hoch (3) bewertet wird.

Kompatibilität – Indikator Einsetzbarkeit in der gesamten Prozesskette:

Das **IC-Verfahren** ist bereits in der Prozesskette zur Behandlung von Kühlgeräten integriert und ist auch dafür entwickelt worden (BHS, 2012) und kann daher mit positiv (3) bewertet werden.

Ebenso sind **Magnetscheider** und **Wirbelstromscheider** Verfahren, die schon seit langem in Prozessketten integriert sind und können daher auch mit positiv (3) bewertet werden.

Das **Schredder-Sand Verfahren** ist als eigener Prozess konzipiert. Es werden die Rückstände aus dem Schreddern in einem separaten, mehrstufigen Verfahren behandelt (DUWE und GOLDMANN, 2012). Das Verfahren ist grundsätzlich kompatibel in dem es an einen Prozess angeschlossen werden kann, aber wird nicht in den Hauptprozess integriert. Daher wird dieses Verfahren mit neutral (2) bewertet.

Verfahren	Weiterentwicklungspotential	Anwendungsbreite	Kompatibilität	Technologieattraktivität
Nahinfrarot-spektroskopie	3	3	3	3
Farbsortierung	3	3	3	3
Röntgensortier-technik	2	3	3	2,7
Induktions-sortierung	1	3	3	2,3

Tabelle 2: Technologieattraktivität - Sensorgestützte Verfahren

Weiterentwicklungspotential – Indikator Leistungssteigerung:

Die **Nahinfrarotspektroskopie** hat, wie in Kapitel 3.2.2.1 schon dargestellt, in den letzten Jahren eine erhebliche Steigerung der Leistungsfähigkeit erfahren. Beispielsweise stieg von 2006 auf 2012 die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Größe der Objekte die detektiert werden können. Während damals eine Detektion von Objekten in der Größe von in etwa 5 x 5 cm möglich war, können heute standardmäßig Objekte mit 6 x 6 mm detektiert werden (STEINERT, 2012). Auch die Leistungsfähigkeit der Datenverarbeitung stieg an. Während im Jahr 2006 noch 10.000 Datenpunkte pro Sekunde erreicht wurden, sind heute 27 Millionen Datenpunkte pro Sekunde Stand der Technik (STEINERT, 2012). Was die Leistungsfähigkeit generell betrifft, werden Werte zwischen einer und acht Tonnen Abfall pro Stunde angegeben, die mittels NIR sortiert werden können (4R SUSTAINABILITY, 2011). Diese Werte sind abhängig von der jeweiligen Anlagenkonfiguration und vom Baujahr der Anlage. Die Leistungsfähigkeit ist vor allem aufgrund der Fortschritte in der IK-Technologie stetig angestiegen. Da ein Ende des Trends, vor allem bei der Steigerung der Leistungsfähigkeiten der Kameras, nicht abzusehen ist, wird hier von einer weiteren Steigerung ausgegangen, weshalb das Weiterentwicklungspotential mit hoch (3) bewertet wird.

Für die **Farbsortierung** gelten nahezu dieselben Bedingungen für die Leistungsfähigkeit wie für die Nahinfrarotspektroskopie. Dadurch, dass hier handelsübliche Kameras eingesetzt werden, kann auch in Zukunft mit fallenden Preisen, beziehungsweise ständigen Leistungssteigerungen gerechnet werden. Auch für die generelle Leistungsfähigkeit, was den Durchsatz betrifft, sind die Zahlen in der gleichen Größenordnung wie bei der Nahinfrarotspektroskopie. Daher wird auch hier das Weiterentwicklungspotential mit hoch (3) bewertet.

Auch bei der **Röntgensortiertechnik** erfolgt die Detektion des Abfallstroms prinzipiell mittels Kameras, allerdings ist zusätzlich eine separate Bestrahlung notwendig und außerdem können bei diesem Verfahren keine handelsüblichen Kameras verwendet werden. Es kommen daher spezielle Kameras zum Einsatz (TITECH, 2012), die zwar auch laufend weiterentwickelt werden, aber nicht in der hohen Geschwindigkeit wie die handelsüblichen Kameras. Bei einem Vergleich der generellen Leistungsfähigkeit verschiedener Röntgensortieranlagen werden, im Vergleich zu den obigen Verfahren, durchgängig Werte in Höhe von einer Tonne Abfall pro Stunde angegeben (4R SUSTAINABILITY, 2011). Dies deutet darauf hin, dass die Leistungsfähigkeit verschiedener Anlagen ähnlich ist und Weiterentwicklungen eher in kleineren Schritten stattfinden. Daher wurde das Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) bewertet.

Wie schon dargestellt, ist die **Induktionssortierung** ein etabliertes Verfahren bei dem keine maßgeblichen Innovationen festgestellt werden konnten. Die Leistungssteigerung wird daher mit niedrig (1) bewertet, da davon ausgegangen werden kann, dass eventuelle Leistungssteigerungen eher inkrementell sind (siehe auch Magnetscheider und Wirbelstromscheider).

Anwendungsbreite – Indikator Gerätekategorien:

Sowohl **Nahinfrarotspektroskopie** als auch **Farbsortierung** sind für eine Vielzahl von Anwendungsfällen einsetzbar, wie zum Beispiel bei der Sortierung von Glas, Kunststoffen und Elektroaltgeräten. Bezüglich der Gerätekategorien innerhalb der Sortierung von EAG sind diese Verfahren daher sehr breit und vielfältig einsetzbar (Großgeräte, Elektrokleingeräte, teilweise Kühl- und Gefriergeräte und Bildschirmgeräte) und werden mit hoch (3) bewertet.

Die Verfahren **Induktionssortierung** und **Röntgensortiertechnik** sind gegenüber den obigen Verfahren nicht so verbreitet und teilweise auf bestimmte Materialeigenschaften eingeschränkt (leitende Metalle), haben aber in Bezug auf die Anwendungsbreite dieselben Voraussetzungen wie die obigen Verfahren und werden daher ebenfalls mit hoch (3) bewertet.

Kompatibilität – Indikator Einsetzbarkeit in der gesamten Prozesskette:

Alle vier beschriebenen Verfahren (**Nahinfrarotspektroskopie, Farbsortierung, Röntgensortierung und Induktionssortierung**) sind so konzipiert, dass diese als Teil der gesamten Prozesskette eingesetzt werden können (MARTENS, 2011). Daher werden alle vier Verfahren mit positiv (3) bewertet.

Verfahren	Weiterentwicklungspotential	Anwendungsbreite	Kompatibilität	Technologieattraktivität
VIS/NIR Spektroskopie	3	3	3	3
TiTech Kabelrückgewinnung	2	3	2	2,3
SpectroDense	2	3	2	2,3

Tabelle 3: Technologieattraktivität - Multisensorsysteme

Weiterentwicklungspotential – Indikator Leistungssteigerung:

Die **VIS/NIR Spektroskopie** ist die Kombination der Verfahren Nahinfrarotspektroskopie und Farbsortierung. Bezüglich dem Weiterentwicklungspotential gelten dieselben Bedingungen wie jeweils für die

einzelnen Verfahren, somit wird das Weiterentwicklungspotential der VIS/NIR Spektroskopie mit hoch (3) bewertet.

Die **TiTech Kabelrückgewinnung** ist eine Kombination eines elektromagnetischen Sensors und eines NIR-Detektors, die für einen speziellen Anwendungsfall ausgelegt wurde, nämlich zur Detektion von Kupferkabel. Vergleichswerte für die Leistungsfähigkeit aus der Vergangenheit liegen bei diesem Verfahren nicht vor. Es kann davon ausgegangen werden, dass wie oben schon erwähnt, für den NIR-Detektor ein hohes Weiterentwicklungspotential angenommen werden kann. Für den elektromagnetischen Sensor wird die Annahme getroffen, dass hier ähnliche Bedingungen vorliegen wie bei der beschriebenen Induktionssortierung, das heißt, es wird ein niedriges Weiterentwicklungspotential angenommen. Der mathematische Mittelwert würde in diesem Fall mittel (2) ergeben, was hier auch als Bewertung herangezogen wird, da eine hohe Weiterentwicklung des NIR-Detektors alleine, also ohne Weiterentwicklung des elektromagnetischen Sensors, die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage steigern kann, womit ein mittleres potential realistisch erscheint.

Das **SpectroDense** Verfahren ist eine Kombination der Verfahren Spektroskopie und Dichtemessung und noch in Entwicklung. Die beiden Verfahren sind am ehesten mit der Röntgensortierung vergleichbar, was die Annahmen zum Weiterentwicklungspotential betrifft. Daher ist die Annahme eines mittleren (2) Weiterentwicklungspotentials als realistisch einzuschätzen. Für eine genauere Einschätzung liegen noch zu wenige Daten aus der Praxis vor.

Anwendungsbreite – Indikator Gerätekategorien:

Wie schon beschrieben, sind Nahinfrarotspektroskopie als auch Farbsortierung für eine Vielzahl von Anwendungsfällen einsetzbar und insbesondere bei der Sortierung von EAG sehr breit und vielfältig einsetzbar. Dies gilt auch für **VIS/NIR Spektroskopie**, weshalb die Anwendungsbreite mit hoch (3) bewertet wird.

Die **TiTech Kabelrückgewinnung** ist speziell für den Anwendungsfall der Detektion von Kupferkabel entwickelt worden. Kupferkabel können in vielen verschiedenen Abfallfraktionen (TITECH, 2012) und somit auch in fast allen Gerätekategorien enthalten sein. Daher wird die Anwendungsbreite mit hoch (3) bewertet.

Das **SpectroDense** Verfahren ist für die Trennung unterschiedlicher Kunststoffsorten in EAG entwickelt worden. Da in fast allen Gerätekategorien Kunststoffe enthalten sind, ist dieses Verfahren prinzipiell auf keine Gerätekategorie eingeschränkt. Da dieses Verfahren allerdings noch in Entwicklung ist und ein Nachweis noch nicht erbracht wurde, dass dieses Verfahren wirklich in allen Kategorien verwendet werden kann, wird die Anwendungsbreite mit hoch (3) bewertet.

Kompatibilität – Indikator Einsetzbarkeit in der gesamten Prozesskette:

Auch hier gelten für **VIS/NIR Spektroskopie** dieselben Annahmen und Bedingungen wie für die einzelnen Verfahren Nahinfrarotspektroskopie und Farbsortierung, weshalb die Kompatibilität ebenfalls mit positiv (3) bewertet wird.

Die **TiTech Kabelrückgewinnung** ist für den Einsatz in einer Prozesskette konzipiert (siehe Abbildung 22). Aber ähnlich wie das Schredder-Sand Verfahren ist dieses Verfahren zwar kompatibel zum Hauptprozess, wird aber nicht in diesen integriert, sondern kann an diesen angeschlossen werden. Daher wird dieses Verfahren mit neutral (2) bewertet.

Das **SpectroDense** Verfahren scheint anhand der vorliegenden Informationen dafür geeignet zu sein, in den Hauptprozess integriert werden zu können, allerdings finden sich dazu noch keine fundierten Aussagen und Nachweise, da dieses Verfahren noch in Entwicklung ist. Daher wird dieses Verfahren mit neutral (2) bewertet.

Verfahren	Weiterentwicklungspotential	Anwendungsbreite	Kompatibilität	Technologieattraktivität
Hydrometallurgie	3	3	2	2,7
Pyrometallurgie	4	4	2	3,3
Haloclean-Pyrolyse	2	2	2	2
Biometallurgie	2	2	2	2

Tabelle 4: Technologieattraktivität - Metallurgische Verfahren

Weiterentwicklungspotential – Indikator Leistungssteigerung:

Die **Hydrometallurgie** dient vorwiegend zur Ablösung von Metallen, hauptsächlich Edelmetallen, vom Trägermaterial. Da dieses Verfahren in Bezug auf EAG noch in Entwicklung ist, liegen bezüglich der Leistungsfähigkeit in der Praxis noch relativ wenige Daten vor. Vor- und Nachteile dieses Verfahrens werden in der Literatur intensiv diskutiert. Einige der Diskussionspunkte betreffen auch die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens wie zum Beispiel eine langsame Reaktionsgeschwindigkeit oder die generelle Komplexität des Prozesses (DITTMAYER et al., 2006). Da aber ein Anstieg der Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren festgestellt werden konnte, wird dies als Indikator gesehen, dass

Potentiale in diesem Verfahren gesehen werden. Ein Weiterentwicklungspotential ist daher sehr realistisch, wenn auch mit Grenzen, und wird daher mit hoch (3) bewertet.

Die **Pyrometallurgie** ist ein bewährtes Verfahren das in der Praxis schon lange im Einsatz ist. Die Leistungsfähigkeit hängt stark von der Anlagengröße ab. Die in Kapitel 3.3.2 erwähnte Anlage hat beispielweise eine Kapazität von 350.00 Tonnen Material pro Jahr (HAGELÜKEN, 2006). Andere Betreiber geben Kapazitäten von 45.000 bis 120.000 Tonnen pro Jahr an (SUNDQVIST, 2013). Da auch hier intensive Forschungsaktivitäten festgestellt wurden, kann auch hier angenommen werden, dass noch großes Potential in der Weiterentwicklung gesehen wird. Weil aber eine hohe Leistungsfähigkeit schon erwiesen ist, wird dieses Verfahren gegenüber der Hydrometallurgie höher, also mit sehr hoch (4) bewertet.

Die **Haloclean-Pyrolyse** ist ein Verfahren das noch in Entwicklung ist. Für die erste in der Praxis eingesetzte Anlage war eine Anlagenleistung von 6.000 Tonnen pro Jahr vorgesehen (KOCH 2007). Allerdings ist bei der Recherche kein Nachweis gefunden worden, dass diese Anlage in Betrieb ist. Da hier zu wenig Daten für eine realistische Einschätzung vorliegen, wird das Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) bewertet.

Die **Biometallurgie** ist im Bereich von EAG noch gänzlich neu. Erste Forschungsprojekte, die die grundlegende Einsatzmöglichkeiten untersuchen, laufen noch. Eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit ist in diesem Stadium schwer möglich. Die Tatsache, dass Forschungsprojekt durchgeführt werden, soll hier als Indiz dienen, dass in diesem Verfahren grundsätzlich ein Potential gesehen wird. Daher wird das Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) bewertet.

Anwendungsbreite – Indikator Gerätekategorien:

Die **Hydrometallurgie** wird im Bereich der EAG hauptsächlich für Leiterplatten entwickelt, beziehungsweise angewendet. Grundsätzlich ist aber ein Einsatz in allen Gerätekategorien möglich und es sind auch schon Forschungen in dieser Richtung im Gange (SAT-RESEARCH, 2012), wobei der tatsächliche Nachweis noch fehlt. Daher wird dieses Verfahren mit hoch (3) bewertet.

Die **Pyrometallurgie** kann prinzipiell alle Produkte behandeln die Metalle wie zum Beispiel Kupfer, Blei und Nickel enthalten. Teilweise sind eigene Prozesse oder Anlagen für spezielle Anwendungsfälle notwendig. Bewährt sind Anlagen, in denen Kupfer abgetrennt wird. In der im Kapitel 3.3.2 erwähnten Anlage können beispielsweise Katalysatoren, Leiterplatten und Mobiltelefone verarbeitet werden (HAGELÜKEN, 2006). Der selbe Betreiber hat aber auch eine eigene Anlage errichtet, die speziell für das Recycling von Lithium-Ionenbatterien und Nickelmetallhydrid-Batterien ausgelegt ist (UMICORE, 2011). Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten wird dieses Verfahren mit sehr hoch (4) bewertet.

Mit der **Haloclean-Pyrolyse** sollen Leiterplatten und Kunststoffe aus Elektroaltgeräten behandelt werden (KOCH, 2007). Somit wird dieses Verfahren vermutlich auf die Gerätekategorien Großgeräte und Elektrokleingeräte beschränkt bleiben. Daher wird dieses Verfahren mit mittel (2) bewertet.

Die Forschung zur **Biometallurgie** konzentriert sich auf die Anwendungsgebiete der Rückgewinnung von Metallen (zum Beispiel Kupfer, Zink, Eisen) und auch schon auf die Rückgewinnung von Edelmetallen. Ob damit alle Gerätekategorien behandelt werden können, kann im Moment nicht abschließend geklärt werden. Der Fokus wird aller Wahrscheinlichkeit nach auf den Leiterplatten sein. Da aber zu wenig gesicherte Fakten vorliegen, wird hier die Anwendungsbreite mit mittel (2) bewertet.

Kompatibilität – Indikator Einsetzbarkeit in der gesamten Prozesskette:

Die **Hydrometallurgie** wird zumeist als eigenständiger Prozess dargestellt, der als Ausgangsmaterial hauptsächlich mechanisch bearbeitete Materialien benötigt. Prinzipiell wäre es möglich, diesen Schritt direkt vorzuschalten. Da der Prozess der Hydrometallurgie aber sehr komplex ist und die dazu nötigen Anlagen sehr kostenintensiv, wird es analog zur Pyrometallurgie so sein, dass europaweit nur sehr wenige Anlagen installiert werden (TESAR, 2009). Das heißt, die mechanische Behandlung wird dezentral in lokalen Abfallbehandlungsanlagen stattfinden und die so behandelten Materialien werden dann gesammelt in großen hydrometallurgischen Anlagen bearbeitet, damit eine ausreichende Menge an Abfall vorhanden ist um die Anlagen wirtschaftlich zu betreiben. Die Kompatibilität wäre gegeben, würde in der Praxis aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht realisiert. Daher wird diese mit neutral (2) bewertet.

Wie schon bei der Hydrometallurgie erwähnt, befinden sich in Europa nur wenige Anlagen zur pyrometallurgischen Behandlung, da diese sehr aufwändig sind und die Errichtung hohe Investitionen erfordert. Daher wird die **Pyrometallurgie** meist als eigenständiger Prozess realisiert, der zumeist mechanisch vorbehandeltes Material benötigt. Dieses Ausgangsmaterial wird dezentral vorbearbeitet und dann in diese Anlagen transportiert (TESAR, 2009). Da die Integration in die Prozesskette in der Realität nicht stattfindet, wird dieses Verfahren mit neutral (2) bewertet.

Die **Haloclean-Pyrolyse** benötigt grob geschreddertes Material. Auch dieses Verfahren wird als eigenständiges Verfahren in einer gesonderten Anlage angedacht. Auch hier werden die gleichen Randbedingungen gelten wie für die Hydrometallurgie, nämlich dass diese Anlagen dezentral errichtet werden und die Vorbehandlung lokal erfolgt. Daher wird dieses Verfahren ebenso mit neutral (2) bewertet.

Für die **Biometallurgie** werden vermutlich auch die Bedingungen gelten, die für die drei oben genannten Verfahren gelten, nämlich wenige, große Anlagen. Daher wird die Kompatibilität ebenso mit neutral (2) bewertet.

Verfahren	Weiterentwicklungspotential	Anwendungsbreite	Kompatibilität	Technologieattraktivität
Projekt SATURN	2	3	2	2,3
Projekt WEEE TRACE	3	2	3	2,7
Projekt E-AIMS	3	2	3	2,7
Projekt REWARD	2	3	4	3
Projekt Poly-Ressource	2	3	2	2,3
Projekt MoveRec	3	2	2	2,3
Projekt MORE	3	1	2	2

Tabelle 5: Technologieattraktivität - Systemübergreifende Innovationen

Weiterentwicklungspotential – Indikator Leistungssteigerung:

Hauptentwicklung im **Projekt SATURN** war, die manuelle Sortierung von Nichteisenmetallen mittels sensorbasierten Sortierverfahren zu automatisieren. Der Schwerpunkt lag dabei eher auf der Erhöhung der Reinheit bei der Sortierung, als bei der Erhöhung der Leistungsfähigkeit (SATURN, 2012). Daher wird dieses Projekt bezüglich dem Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) bewertet.

Im **Projekt WEEE-TRACE** wird der Einsatz von RFID und Bilderfassungstechnologien erforscht. Damit soll vorwiegend die Qualität (Sammlung und Trennung) des Prozesses optimiert werden. Angaben zu Leistungssteigerungen konnten in der Recherche nicht ausfindig gemacht werden. Allerdings werden hier Technologien eingesetzt die, analog zu Farbsortierung, selber stetig leistungsfähiger werden (Kameras). Daher ist es realistisch, wenn die Annahme getroffen wird, dass hier ein Potential zur Leistungssteigerung vorhanden ist. Daher wird dieses Projekt mit hoch (3) bewertet.

Mit dem **Projekt E-AIMS** soll vorwiegend die Qualität der Behandlung optimiert werden. Voraussetzung dafür ist, dass in den Geräten die behandelt werden Transponder zur Identifikation vorhanden sind. Eine Leistungssteigerung wird nicht direkt erwähnt und ist auch nicht quantifiziert. Allerdings kann, analog zum Projekt WEEE-TRACE, davon ausgegangen werden, dass aufgrund der eingesetzten

Technologien ein Weiterentwicklungspotential vorhanden ist, womit dieses mit hoch (3) bewertet wird.

Das **Projekt REWARD** integriert verschiedene innovative Sortierverfahren in eine Prozesskette. Damit sollen verschiedene Fraktionen mit hoher Reinheit erzeugt werden. Es steht also auch hier eher die Erhöhung der Qualität im Vordergrund. Durch die Kombination unterschiedlicher Sortierverfahren, von der relativ einfachen Grobzerkleinerung bis hin zu Dichtentrennungen, sind auch unterschiedliche Potentiale an Leistungssteigerungen möglich. Für die Gesamtbewertung werden die einzelnen Verfahren bewertet. Der Mittelwert wird als Näherung für die Bewertung herangezogen.

- Grobzerkleinerung für eine verbesserte Aufschließung und Trennung: niedrig (1)
- Metalldetektion für die Sortierung und die Trennung von Metallen: niedrig (1)
- Magnetische Trennung: niedrig (1)
- Wirbelstromtrennung für leitfähige, nicht-magnetische Metalle: niedrig (1)
- Erweiterte Dichtentrennung für Polymere und Metalle: hoch (3)
- Elektro-magnetische Sortierung für nicht-magnetischen Edelstahl: niedrig (1)
- Röntgenfluoreszenz für die Trennung von ferromagnetischen Metallen und Kupferspulen: mittel (2)
- Farbsensorsortierung für die Trennung von farbigen Metallen und Polymeren: hoch (3)
- Röntgensortierung für die Trennung von halogenierten Polymeren: mittel (2)
- Dichtentrennung zur Abspaltung von leichten Kunststoffen aus schweren Kunststoffen: hoch (3)
- Nahinfrarotspektroskopie für Trennung von Polymeren: hoch (3)
- Farbsortierung zur Trennung von grauem und schwarzen Kunststoff: hoch (3)

Daraus ergibt sich ein Mittelwert von mittel (2), der somit für die Bewertung der Weiterentwicklung herangezogen wird.

Das Projekt **Poly-Ressource** basiert auf dem CreaSolv-Prozess und ist somit mit der HaloClean-Pyrolyse vergleichbar, die auf diesem Prinzip basiert. Da auch das Projekt Poly-Ressource noch in Entwicklung ist und keine Daten für eine realistische Abschätzung vorliegen, wird auch hier das Weiterentwicklungspotential mit mittel (2) angegeben.

Das Projekt **MoveRec** verfolgt das Ziel, bestehende Anlagen zu optimieren, beziehungsweise die Planung neuer Anlagen zu unterstützen. Dabei soll jedenfalls eine Leistungssteigerung erreicht werden. Somit wird das Weiterentwicklungspotential des Projekts MoveRec mit hoch (3) bewertet.

Das **Projekt MORE** sucht Lösungen zur Behandlung von Elektromotoren von Elektrofahrzeugen und insbesondere zur Rückgewinnung der in den Magneten verwendeten Metalle der seltenen Erden. Dafür soll ein neuer, eigener Prozess entwickelt werden. Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit und somit eine Bestimmung einer Leistungssteigerung ist momentan nicht möglich. Wenn dieses Verfahren allerdings ausgereift ist, kann aber davon ausgegangen werden, dass damit eine effizientere Behandlung für diese Anwendungsfälle möglich ist. Daher wird dieses Verfahren mit hoch (3) bewertet.

Anwendungsbreite – Indikator Gerätekategorien

Das Projekt **SATURN** ist im wesentlichen eine Sortierung von Nichteisenmetallen. Daher ist dieses Verfahren in Bezug auf die Anwendungsbreite der Induktionssortierung am ähnlichsten. Daher gelten hier dieselben Annahmen und die Anwendungsbreite wird ebenfalls mit hoch (3) bewertet.

Die Grundsätzliche Idee des **Projekt WEEE-TRACE** ist es, das Gerät zu identifizieren und dann in der Prozesskette auch zu verfolgen. Die Identifikation soll zum Beispiel durch die Erkennung des Logos des Herstellers des Geräts oder durch die Erkennung des Typenschilds beziehungsweise Barcodes erfolgen. Dies schränkt die Technologie auf jene Geräte ein, die solche Merkmale besitzen. Eine Identifikation von zum Beispiel Kleinstgeräten oder Batterien wird anhand der bisher vorliegenden Erfahrungen (WEEE TRACE, 2012) noch nicht so schnell realisierbar sein. Durch diese Einschränkungen wird die Anwendungsbreite mit mittel (2) bewertet.

Die Entwickler des **Projekts E-AIMS** geben an, dass die vorliegende Lösung zur Behandlung aller Gerätekategorien verwendet werden kann (E-AIMS, 2012). Dazu wäre anzumerken, dass dies nur unter der Voraussetzung möglich ist, wenn das Gerät groß genug ist um einen Transponder anzubringen. Es können daher ähnliche Annahmen wie bei dem Projekt WEEE-TRACE getroffen werden, weshalb die Anwendungsbreite mit mittel (2) bewertet wird.

Im **Projekt REWARD** sind prinzipiell alle Gerätekategorien verwertbar, die die einzelnen Verfahren ermöglichen. Somit könnte dieses Verfahren mit sehr hoch bewertet werden. Das Projekt fokussiert allerdings auf Kunststoffe, Metalle (inklusive Edelmetalle) und Elemente der Seltene Erden und ist bei einigen Fraktionen noch im Entwicklungsstadium (zum Beispiel Kunststoffgehäuse von Flachbildschirmen). Daher wird dieses Verfahren mit hoch (3) bewertet.

Das **Projekt Poly-Ressource** soll dazu eingesetzt werden, alle Arten von Kunststoffen aus EAG zu behandeln. Somit sind fast alle Gerätekategorien als Anwendungsfall möglich, weshalb die Anwendungsbreite mit hoch (3) bewertet wird.

Mit den Methoden aus dem **Projekt MoveRec** können theoretisch alle Behandlungsanlagen und somit auch alle Gerätekategorien betrachtet und optimiert werden. Da es sich hierbei aber um kein Verfahren an sich handelt, mit dem Geräte behandelt werden können, wird hier die Bewertung mittel (2) vorgeschlagen.

Das **Projekt MORE** wird primär für die Rückgewinnung von Metallen der seltenen Erden aus Magneten von Elektromotoren durchgeführt. Somit ist eine starke Einschränkung der Anwendungsbreite gegeben, weshalb dieses Verfahren mit niedrig (1) bewertet wird.

Kompatibilität – Indikator Einsetzbarkeit in der gesamten Prozesskette:

Das **Projekt SATURN** ist so konzipiert, dass diese Technologie in eine bestehende Prozesskette integriert wird beziehungsweise dass eine manuelle Sortierung durch eine sensorgestützte Sortierung ersetzt wird. Somit ist die Kompatibilität auf bestimmte Prozesse eingeschränkt, weshalb diese mit neutral (2) bewertet wird.

Das **Projekt WEEE-TRACE** ist dafür gedacht in die Prozesskette integriert zu werden. Die angedachte Verfolgung der Geräte innerhalb der Behandlungskette macht auch nur dann Sinn, wenn diese an verschiedenen Stellen möglich ist. Da dies aber noch Teil der Entwicklung ist und noch keine Angaben dazu gefunden wurden wo in der Prozesskette schlussendlich ein Einsatz erfolgen soll, wird dieses Verfahren nicht mit dem Höchstwert, sondern mit positiv (3) bewertet.

Die Entwicklung die hinter dem **Projekt E-AIMS** steht, soll grundsätzlich vollständig in die Prozesskette integriert werden können. Da dieses Projekt noch in Entwicklung ist und Nachweise dafür fehlen, dass dies auch tatsächlich möglich ist, wird die Kompatibilität mit positiv (3) bewertet.

Das **Projekt REWARD** ist dafür ausgelegt, an allen Stellen einer Prozesskette einsetzbar zu sein und ist dadurch, dass verschiedene Verfahren kombiniert werden, in höchstem Maße kompatibel mit bestehenden Prozessen. Daher wird die Kompatibilität mit sehr hoch (4) bewertet.

Das **Projekt Poly-Ressource** ist als eigenständiger Prozess konzipiert. Ziel dieser Entwicklung ist nicht nur die Behandlung der Kunststoffe, sondern auch die Optimierung der vorgelagerten Prozesse. Das Projekt ist somit zwar kompatibel zu den gängigen Verfahren (zum Beispiel Schredder), wird aber, da es als eigenständiger Prozess konzipiert ist, mit neutral (2) bewertet.

Mit den Methoden aus dem **Projekt MoveRec** können theoretisch alle Behandlungsanlagen und somit auch alle Prozessketten betrachtet und optimiert werden. Da es sich hierbei aber um kein Verfahren an sich handelt welches in eine

Prozesskette integriert werden kann, wird hier analog zur Bewertung der Anwendungsbreite die Bewertung neutral (2) vorgeschlagen.

Das **Projekt MORE** ist als eigenständiger Prozess geplant, in dem aber auch gängige Verfahren integriert sein sollen (zum Beispiel Hydrometallurgie). Da auch hier ein eigenständiger Prozess vorliegt, der aber grundsätzlich kompatibel zu anderen Verfahren ist wird auch hier die Kompatibilität mit neutral (2) bewertet.

5.3 Ressourcenstärke

Für den zweiten Schritt wäre nach der Einstufung der Technologieattraktivität noch die Bewertung der Ressourcenstärke notwendig und zwar nach den Indikatoren: Technisch-qualitativer Beherrschungsgrad, Potential, (Re-)Aktionsgeschwindigkeit. Mit diesen Indikatoren und der anschließenden Bewertung der Ressourcenstärke wird ausgedrückt, in welchem Umfang ein Unternehmen in der Lage ist, die betrachtete Technologie erfolgreich im Unternehmen einzusetzen. Dies sind individuelle Punkte, die für jedes Unternehmen anders sind. Daher soll in dieser Arbeit auf diesen Schritt verzichtet werden. Die Intention ist aber, dass ein Unternehmen die obigen Bewertungen verwenden kann, um die Einsatzmöglichkeit der jeweiligen Technologie im eigenen Umfeld zu prüfen, in dem die noch fehlende Bewertung der eigenen Ressourcenstärke durchgeführt wird. Dann kann mit den beiden Kriterien Technologieattraktivität und Ressourcenstärke der dritte Schritt, die Auswertung des Technologieportfolios, durchgeführt werden. Als Ergebnis liegt dann eine Handlungsempfehlung in vier Kategorien vor: Investitionsfeld (T1), Desinvestitionsfeld (T2), Technologieattraktives Selektionsfeld (T3), Ressourcenstarkes Selektionsfeld (T4). Die Auswertung erfolgt am einfachsten in graphischer Form, wie auch in der folgenden Abbildung dargestellt ist (VAHS und BURMESTER, 2005).

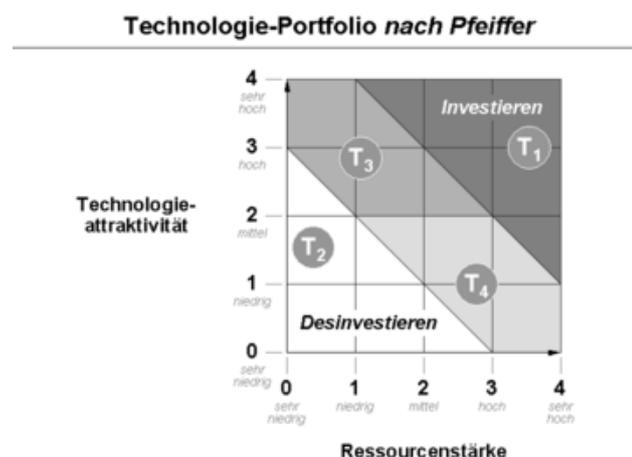


Abbildung 33: Handlungsempfehlungen der Technologie-Portfolio-Analyse (VAHS und BURMESTER, 2005)

6. Das Innovationssystem Sortiertechnologien

Bei einer im Jahr 2007 durchgeführten Forschungsarbeit (HENZELMANN et al., 2007) wurden zehn vielversprechende Umwelttechnologien anhand von Kriterien wie Wachstumspotenzial, Marktgröße, Innovationsdynamik und Potential zur Umweltentlastung genauer untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf Unternehmensumfragen. Eine dieser Technologien ist das automatische Sortierverfahren (in der Abb. „Stofftrennung“). Im Rahmen dieser Arbeit zeigte sich, dass alle untersuchten Technologiebereiche noch sehr klein sind, aber ein hohes Wachstumspotential aufweisen. Speziell bezogen auf die automatischen Sortierverfahren wurde, ausgehend von einem Marktvolumen im Jahr 2005 von 0,2 Milliarden Euro, ein Anstieg des Marktvolumens im Jahr 2020 auf 1,4 Milliarden Euro geschätzt. Damit ist das automatische Sortierverfahren im Vergleich der absoluten Wachstumsraten eher im unteren Bereich (siehe Abbildung 34), aber prozentual gesehen im Mittelfeld (Wachstum von 14 Prozent).

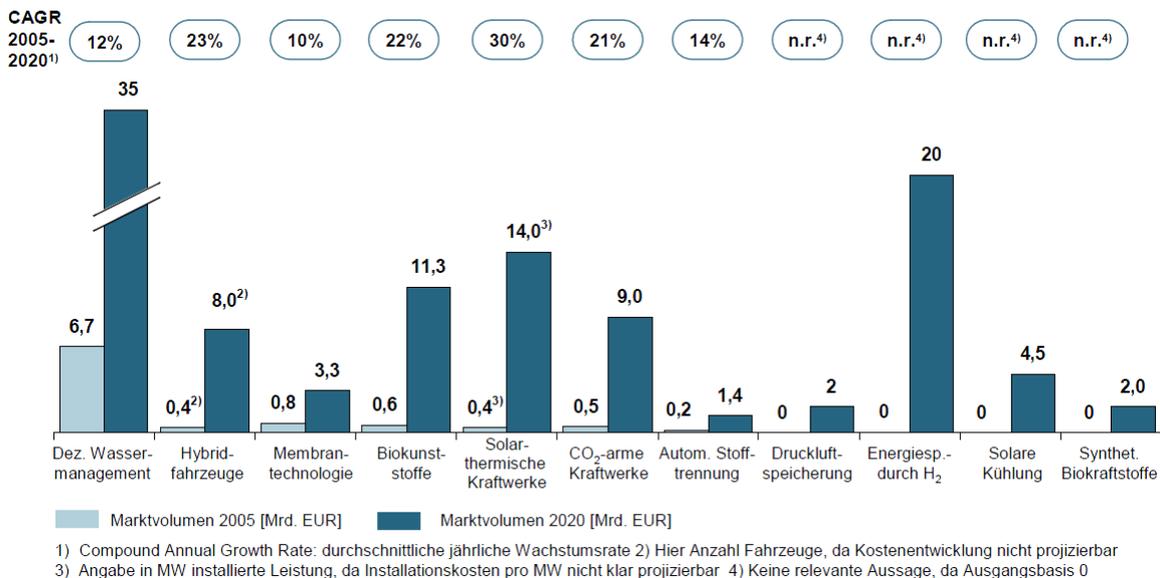


Abbildung 34: Projektion des Marktvolumens bis 2020 (HENZELMANN et al., 2007)

Regional betrachtet ist der größte Markt mit einem Anteil von etwa 60 Prozent in Europa, wovon ungefähr ein Drittel allein in Deutschland abgesetzt wird. Kurzfristig wird Europa auch der stärkste Markt bleiben, aber langfristig gehen die Unternehmen davon aus, dass Asien und Nordamerika die wichtigsten Märkte sein werden.

Bezüglich Innovationen geben die Unternehmen an, dass die Nachfrage des Marktes und der Kunden die größten Treiber für Entwicklungen sind. Allerdings hängen diese, nämlich der Markt und die Kunden, beziehungsweise die Abfallwirtschaft generell, sehr stark von politischen Entscheidungen ab. Dies kann sowohl negative als auch positive Auswirkungen für die Unternehmen haben. So

führt zum Beispiel eine politische Entscheidung für eine Bevorzugung oder Erhöhung der Müllverbrennung zu einer geringeren Nachfrage an Sortiertechnologien. Im Fall der Sortiertechnologien überwiegen aber die positiven Auswirkungen, da die rechtlichen Rahmenbedingungen diese Technologien eher fördern. Dieser Zusammenhang, nämlich, dass der Markt für Sortiertechnologie nur deshalb so stark ist, da die politischen Entscheidungen die Sortierung unterstützt, ist den befragten Unternehmen durchaus bewusst.

Weitere Treiber für innovative Sortiertechniken sind außerdem der stetige Anstieg der Abfallmengen und der derzeitige Anstieg der Rohstoffpreise. Beide Faktoren machen ein Sortieren und anschließendes Recycling von wertvollen Rohstoffen wieder interessant. Dazu kommt noch die Verknappung der Metalle der seltenen Erden, die aller Wahrscheinlichkeit nach in Zukunft noch stärker nachgefragt werden als jetzt (HENZELMANN et al., 2007).

In der folgenden Tabelle sind die aktuell am Markt anbietenden Unternehmen aufgelistet.

Unternehmen	Land	Kontakt
Best Sorting	Belgien	www.bestoratec.com
Buhler	USA	www.buhlersortex.com
BT-Wolfgang Binder GmbH	Österreich	www.redwave.at
EagleVizion	Kanada	www.eaglevizion.com
Eveready Manufacturing Pte Ltd	Singapur	www.eveready-mfg.com
Green Machine	USA	www.greenmachinesales.com
Innov-X Systems Inc.	USA	www.innovx.com
Mogensen GmbH	Deutschland	www.mogensen.de
MSS (A Division of CP Manufacturing)	USA	www.magsep.com
National Recovery Technologies (NRT)	USA	www.nrt-inc.com
Pellenc	USA	www.pellencst.com
Rhewum	Deutschland	www.rhewum.de
Rofin Australia Pty Ltd.	Australien	www.rofinrapidsort.com.au

RTT Steinert GmbH	Deutschland	www.steinert.de
Satake USA Inc.	USA	www.satake-usa.com
S+S Separation and Sorting Technology GmbH	Deutschland	www.se-so-tec.com
Unisensor	Deutschland	www.unisensor.de
TiTech GmbH	Deutschland/Norwegen	www.titech.com
Visys Recycling	Belgien	www.visysrecycling.com

Tabelle 6: Hersteller von Sortiersystemen (eigene Darstellung nach 4R SUSTAINABILITY, 2011)

Im Jahr 2007 war TiTech der Marktführer, der die Hälfte des Marktes abgedeckt hat. An zweiter und dritter Stelle folgten dann Pellenc und RTT, die jeweils 15 Prozent des Marktes abdeckten. Im Glassektor dominierte BT-Wolfgang Binder GmbH und S+S den Markt. Diese Unternehmen sind vorwiegend mittelständische Unternehmen und sind allesamt sehr stark international ausgerichtet (HENZELMANN et al., 2007).

Die Dynamik dieser Branche spiegelt sich auch in der Veränderung der Anzahl und Kooperation der Akteure wieder. Es herrscht eine starke Konsolidierung und viele Übernahmen finden statt. So hat zum Beispiel Buhler die Firma Sortex übernommen, TiTech hat die Firma Commodas übernommen. Innov-X und BT Wolfgang Binder GmbH haben ein Joint Venture abgeschlossen und RTT und Steinert haben fusioniert. Es wird erwartet, dass sich dieser Trend auch weiterhin fortsetzen wird (4R SUSTAINABILITY, 2011). Die Unternehmen selber geben an, dass der Wettbewerb in dieser Branche sehr hoch ist und dass es durch die geringe Anzahl von Akteuren sehr oft zu hohem Preisdruck und Konfrontationen kommt. Sie gehen davon aus, dass sich dies in Zukunft noch verschärfen wird und dass eine weitere Konsolidierung wahrscheinlich ist (HENZELMANN et al., 2007). Außer Übernahmen und Fusionen zeichnet sich aber jetzt schon ab, dass es des Öfteren zu Kooperationen in Form von strategischen Partnerschaften, Arbeitsgemeinschaften oder Allianzen kommen wird. Sowohl zwischen den Herstellern untereinander als auch mit den Zulieferern (4R SUSTAINABILITY, 2011).

7. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

7.1 Ergebnisse

Weiterentwicklungen finden in allen klassischen Verfahren statt, von den direkten Verfahren (zum Beispiel Magnetscheider, Wirbelstromscheider) bis zu den sensorgestützten Verfahren (zum Beispiel Farbsortierung, Röntgensortiertechnik). Hierbei konnten mit einer Ausnahme ausschließlich Innovationen festgestellt werden, die bereits im Einsatz sind. Der einzige Anwendungsfall eines Verfahrens, das noch nicht im Einsatz ist und auch nicht im Entwicklungsstadium, wurde schlichtweg wieder aufgegeben, die Automatische Entstückung von Leiterplatten mittels Farbsortierung. Unterschiedlich sind jedoch die Arten der Innovationen. Während bei den direkten Sortierverfahren die Verbesserung einzelner Komponenten im Vordergrund steht, meist mit den Zielen einer Verringerung des Energieverbrauchs und/oder Verringerung des Verschleiß, steht bei den sensorgestützten Verfahren meist die Verbesserung der Sortiergenauigkeit im Vordergrund. Treiber für Innovationen bei diesen Verfahren sind die raschen Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik, die für stetig fallende Preise für Hard- und Software, beziehungsweise auf der anderen Seite für ständig höhere Leistungen sorgen.

Multisensorsysteme kombinieren einzelne Verfahren und nutzen somit die jeweiligen Vorteile. Dadurch ergeben sich teilweise gänzlich neue Sortiermöglichkeiten. Auch hier sind die Fortschritte der IKT-Technologie die Basis für weitere Innovationen. Weitere Kombinationen von verschiedenen Verfahren, wie sie ansatzweise auch in Projekten der systemübergreifenden Verfahren erprobt werden, könnten auch in Zukunft neue Anwendungsmöglichkeiten bringen oder zumindest die bestehenden weiter verbessern. Die hier angeführten Projekte sind teils noch in Entwicklung und teils schon im Einsatz.

Neben der Weiterentwicklung der rein technisch orientierten Verfahren finden Innovationen auch im Gesamtsystem statt. Bei diesen systemübergreifenden Innovationen steht dabei die Verbesserung der gesamten Prozesskette im Vordergrund. Dies kann durchaus eine Optimierung an zumindest zwei Stellen des Prozesses sein, aber es wird dabei auch immer das System mit betrachtet. Daher sind hierbei sowohl technische als auch organisatorische Innovationen festzustellen. Bemerkenswert ist, dass hier der einzige Fall auftritt, in dem eine gänzlich neue Technologie, nämlich RFID eingesetzt wird. Diese Projekte befinden sich meist noch im Entwicklungsstadium, aber teilweise auch schon in der Demonstrationsphase.

Im Bereich der metallurgischen Verfahren konnten einige Weiterentwicklungen festgestellt werden. Obwohl diese Verfahren sehr aufwändig sind und die Anlagen nur wirtschaftlich sind, wenn große Mengen verarbeitet werden, scheinen diese Verfahren für die Zukunft sehr vielversprechend zu sein. Dies mag daran liegen, dass diese neuen Verfahren hauptsächlich auf diejenige Elektroaltgeräte

ausgerichtet sind, die jetzt schon in großer Menge vorhanden sind, wie zum Beispiel Notebooks, Mobiltelefone und Smartphones und von denen in naher Zukunft noch größere Mengen erwartet werden, wie zum Beispiel Batterien für Elektrofahrzeuge. Hinzu kommt, dass diese Geräte mit den anderen Sortierverfahren noch nicht wirtschaftlich trennbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die Behandlung von Leiterplatten. Trotz der hohen Investitionskosten wird in die Errichtung solcher Anlagen investiert, auch wenn aktuell genügend Kapazitäten in den bestehenden Anlagen vorhanden sind. Es wird auch in diesem Bereich stetig weiter geforscht. Allerdings wird darauf verwiesen, dass für ein optimales Recycling Verbesserungen vor allem in den vorgelagerten Prozessen notwendig sind, wie zum Beispiel Produktdesign und Sammlung.

Die anschließend durchgeführte Bewertung der Technologieattraktivität liefert die Basis für eine vollständige Technologie-Portfolio-Analyse, mit der ein Unternehmen anhand seiner individuellen Daten für die Ressourcenstärke die jeweilige Technologie bewerten kann. In diesem ersten Schritt wurde das Verfahren Pyrometallurgie am besten bewertet, vor allem deshalb, weil dieses ein sehr hohes Weiterentwicklungspotential und eine sehr hohe Anwendungsbreite aufweist.

Diese Bewertung wurde in einem ersten Schritt ausschließlich anhand der erhobenen Daten durchgeführt, um diese Methode grundsätzlich zu testen, wobei sich gezeigt hat, dass die Anwendung dieser Methode in einem bestimmten Bereich möglich ist. Allerdings hat sich herausgestellt, dass vor allem die Bewertung der Leistungsfähigkeit sehr schwierig war, da hier zu wenige Daten vorlagen.

Treiber für Innovationen im System der Sortiertechnologien ist vor allem die Nachfrage des Marktes beziehungsweise der Kunden nach neuen Behandlungsverfahren. Diese hängt allerdings meist von den politischen Vorgaben ab, womit diese meist die wirklichen Treiber für Innovationen sind. Als weiterer Treiber werden auch der weitere Anstieg der Abfallmengen und der Anstieg der Rohstoffpreise genannt. Diese Faktoren machen ein Recycling vor allem ökonomisch wieder attraktiv. Ein weiterer Motivationsgrund für einige Projekte ist der erwartete Anstieg des Verkaufs von E-Fahrzeugen und damit die Zunahme von Batterien. Auf dieses erwartete Problem sollen schon jetzt Antworten gegeben werden.

Diese Innovationen finden in einem Umfeld statt, in dem der Wettbewerb äußerst hoch ist. Es sind wenige Akteure am Markt und es herrscht ein ständiger Preisdruck. Um in diesem Umfeld bestehen zu können, ist die eine Strategie, durch laufende Weiterentwicklungen bessere Produkte als die Konkurrenz anbieten zu können. Der andere Weg, der deutlich erkennbar ist, ist eine Konsolidierung, also zum Beispiel Übernahmen, Fusionen, Joint Ventures oder ähnliche Konstruktionen, die die Hersteller eingehen.

7.2 Schlussfolgerungen

Der Anstieg der Abfallmengen, die stetig steigenden Rohstoffpreise und die politischen Randbedingungen, hauptsächlich die WEEE-Richtlinie, sind der hauptsächliche Auslöser für Innovationen im Bereich der Behandlung von Elektroaltgeräten. Dabei stehen zumeist Ziele im Vordergrund, wie eine Verbesserung der Trennung und dadurch höhere Reinheit der Fraktionen, größere Durchsatzmengen und natürlich betriebswirtschaftliche Optimierungen.

Bezüglich der Technologien können drei aktuelle Trends in unterschiedlicher Ausprägung ausgemacht werden:

- Kombination bestehender Technologien
- Weiterentwicklung bestehender Technologien
- Einführung neuer Technologien

Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Kombination bestehender Technologien, die aber ihrerseits auch ständig weiterentwickelt werden und daher auch an zweiter Stelle liegen. An dritter Stelle liegt die Einführung neuer Technologien, für die aktuell lediglich der Einsatz von RFID angegeben werden kann.

Auch zukünftige Entwicklungen werden von diesen Trends beeinflusst werden. Hinzukommen wird wahrscheinlich eine immer stärkere Fokussierung auf Verfahren für spezielle Produktgruppen wie zum Beispiel Smartphones, Bildschirme oder Batterien, die dann in großen Anlagen effizient behandelt werden können. Um zu vermeiden, dass hierbei viele zusätzliche Transporte anfallen, sollten die logistischen Voraussetzungen aber ebenfalls mitgedacht werden. Die ersten Projekte mit RFID-Technologie zeigen auch die Entwicklung in Richtung „intelligente Abfälle“. Hier kann davon ausgegangen werden, dass immer mehr Informationen über die Produkte in die Prozesskette einfließen werden.

Regional betrachtet scheint es, dass grob gesagt Europa bei den klassischen Technologien wie zum Beispiel den sensorgestützten Verfahren Technologievorreiter ist und die asiatischen Länder im Bereich der Metallurgie die Entwicklungen vorantreiben. Hier könnte die europäische Technologiepolitik die Förderungen dementsprechend gestalten, um weiterhin die Stärken zu stärken.

Eine weitere Konsequenz aus diesen Entwicklungen sind die stetig steigenden Anforderungen an MitarbeiterInnen, die im Bereich der Behandlung von Elektroaltgeräten beschäftigt sind. Technisch anspruchsvolle Verfahren, kombiniert mit ständig steigenden Umwelanforderungen und immer mehr rechtliche Anforderungen erfordern hoch qualifizierte MitarbeiterInnen in allen Bereichen dieser Prozesskette. Dies kann eine Chance für diesen Bereich sein, speziell im europäischen Raum ein noch attraktiverer Arbeitgeber für anspruchsvolle Arbeitsplätze zu sein.

Bezüglich der Bewertungsmethode lässt sich folgern, dass bei einer zukünftigen Durchführung einer Technologie-Portfolio-Analyse beziehungsweise einer

Technologiebewertung auf jeden Fall valide Daten und Informationen vorliegen müssen. Diese sind allerdings bei Technologien, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden, sehr schwer aufzutreiben, da diese Daten in dieser Phase oft noch nicht vorliegen. Hier wäre es sinnvoll, dass sich spätere Anwender schon in die Entwicklungsphase einbringen, um diese für den Anwender wichtigen Fragen frühzeitig klären zu lassen.

Insbesondere die Bewertung der Leistungsfähigkeit hat sich als schwierig herausgestellt. Dazu sind Informationen notwendig, die meist nicht vorliegen, was beim Design dahingehend berücksichtigt werden könnte, dass speziell hier Abschätzungen durch ExpertInnen durchgeführt werden könnten.

Dazu wird die Abhaltung eines Workshops empfohlen. In diesem könnten einerseits die einzelnen Verfahren genau beschrieben werden und andererseits die Bewertungsmethode ausführlich dargestellt werden. Dies scheint notwendig, da in der Technologieidentifikation sehr viele verschiedene Verfahren und Projekte identifiziert wurden, die vermutlich nicht allen ExpertInnen geläufig sind. Um bei der Bewertung eine möglichst hohe Qualität zu erreichen, ist es aber erforderlich, dass alle Personen den gleichen Wissensstand haben. Wollte man diese Bewertung mittels Fragebogen durchführen, müsste dieser eine ausführliche Erklärung der Methodik sowie eine Beschreibung der einzelnen Verfahren enthalten. Dabei besteht die Gefahr, dass der Fragebogen zu lang wird und entweder von zu wenigen TeilnehmerInnen beantwortet wird oder die Bewertung zu oberflächlich durchgeführt wird. Beides würde dazu führen, dass die Qualität abnimmt. Denkbar wären auch Fachgespräche, die dann einzeln durchgeführt werden müssten. Allerdings wäre es auch hier empfehlenswert, dass diese Gespräche persönlich durchgeführt werden und nicht per Telefon oder per Mail.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht zur Behandlung von Elektroaltgeräten (SCHLUEP et al., 2009)	6
Abbildung 2: Austragsgut nach dem Schreddern (BHS, 2012)	8
Abbildung 3: Austragsgut nach dem Schreddern – Eisen (BHS, 2012)	8
Abbildung 4: Austragsgut nach dem Schreddern – Nichteisenmetall (BHS, 2012).....	9
Abbildung 5: Austragsgut nach dem Schreddern – Kunststoffe (BHS, 2012)	9
Abbildung 6: Magnettrommel (WAGNERMAGNETE, 2012)	11
Abbildung 7: Überbandmagnetscheider (STEINERT, 2012).....	12
Abbildung 8: Wirbelstromscheider (IFE-Bulk, 2012).....	13
Abbildung 9: Exzentrisch angeordneter Magnet (STEINERT, 2012)	14
Abbildung 10: Sensorgestützte Sortierung allgemein (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)	16
Abbildung 11: NIR im elektromagnetischen Spektrum (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)	17
Abbildung 12: Spektren von PE, PP, PVC (BALTHASAR und REHRMANN, 2006) .	17
Abbildung 13: Nahinfrarotspektroskopie (STEINERT, 2012)	18
Abbildung 14: VIS im elektromagnetischen Spektrum (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)	20
Abbildung 15: Farbsortierung (STEINERT, 2012).....	21
Abbildung 16: Farbsortierung Vorderansicht (STEINERT, 2012)	21
Abbildung 17: Elektromagnetisches Spektrum Röntgensortiertechnik (WEISS und FELBER, 2010)	23
Abbildung 18: Röntgensortierung (WEISS und FELBER, 2010).....	24
Abbildung 19: Induktionssortierung (STEINERT, 2012).....	25
Abbildung 20: Elektromagnetisches Spektrum VIS/NIR (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)	26

Abbildung 21: Schematische Darstellung VIS/NIR Detektion (BALTHASAR und REHRMANN, 2006)	27
Abbildung 22: Schematische Darstellung Kabelrückgewinner (TITECH, 2012).....	28
Abbildung 23: Ergebnis der Sortierung mit Kabelrückgewinner (TITECH, 2012)	28
Abbildung 24: Schematischer Prozess Umicore (LANUV, 2011)	33
Abbildung 25: Schema Projekt LithoRec (BÄRWALDT, 2010)	35
Abbildung 26: Prozessschema Haloclean-Pyrolyse (KOCH, 2007)	36
Abbildung 27: Zerkleinerte Leiterplatten und Rückstände nach zweistufiger Pyrolyse (KOCH, 2007)	37
Abbildung 28: Zerkleinerte Mobiltelefone und Rückstände nach zweistufiger Pyrolyse (KOCH, 2007).....	37
Abbildung 29: Systemskizze Projekt SATURN (SATURN, 2012).....	40
Abbildung 30: Optische Erkennung eines Logos (REDONDO und FISER, 2012)	42
Abbildung 31: Schema Projekt E-AIMS (E-AIMS, 2012)	43
Abbildung 32: CreaSolv-Prozess (KOCH, 2007).....	47
Abbildung 33: Handlungsempfehlungen der Technologie-Portfolio-Analyse (VAHS und BURMESTER, 2005).....	65
Abbildung 34: Projektion des Marktvolumens bis 2020 (HENZELMANN et al., 2007)	66

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technologieattraktivität – Direkte Sortierverfahren	52
Tabelle 2: Technologieattraktivität - Sensorgestützte Verfahren	54
Tabelle 3: Technologieattraktivität - Multisensorsysteme	56
Tabelle 4: Technologieattraktivität - Metallurgische Verfahren	58
Tabelle 5: Technologieattraktivität - Systemübergreifende Innovationen	61
Tabelle 6: Hersteller von Sortiersystemen (eigene Darstellung nach 4R SUSTAINABILITY, 2011)	68

10. Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BG	Bildschirmgeräte
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EAG	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
EG	Europäische Gemeinschaft
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GG	Großgeräte
GEL	Gasentladungslampen
H-FCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
H-FKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HIPS	High Impact Polystyrene
IC	Impact Catalysator
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KG	Kleingeräte
KGG	Kühl- und Gefriergeräte
KW	Kohlenwasserstoffe
LCD	Liquid Crystal Display
NE	Nichteisen
NIR	Nahes Infrarot
PBB	Polybromiertes Biphenyl
PBDE	Polybromierter Diphenylether

PBDD/F	Polybromierte Dibenzodioxine und-furane
PE	Polyethylen
PC	Polycarbonat
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
RFID	Radio-Frequenzy Identification
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances (in electrical and electronic equipment)
RWTH	Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen
VIS	Visible, sichtbarer Bereich
WEEE	Waste electrical and electronic equipment

11. Quellenverzeichnis

- 4R SUSTAINABILITY, INC.: Demingling the mix: An assessment of commercially available automated sorting technology. Second Edition, 2011.
- ABFALLWIRTSCHAFTSGESETZ: Verordnung über die Ablagerung von Abfällen (Deponieverordnung); BM für Wirtschaft und Arbeit; BGBl. Nr. 164/1996 in der Fassung BGBl. II Nr. 49/2004, 2004.
- AMER A.: Processing of Copper Anode-Slimes for Extraction of Metal Values, Physicochemical Problems of Mineral Processing, Ausgabe 36, S. 123 -134, 2002.
- ANGERER G., ERDMANN L., MARSCHEIDER-WEIDEMANN F., SCHARP M., LÜLLMANN A., HANDKE V., MARWEDE M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009
- BÄRWALDT, G.: LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, Vortrag auf dem 11. Symposium Energieinnovation Graz, 2010.
- BALTHASAR D., REHRMANN V.: VIS/NIR Spektroskopie zur Wertstoffsartierung und Qualitätsanalyse; Vortrag beim Farbworkshop 2006, APZ Ilmenau, 2006.
- BAIRD P., HERMAN H., STEVENS G.: Rapid Assessment of Electronics Enclosure Plastics, Issue in Environmental Science and Technology, 27, Electronic Waste Management, Royal Society of Chemistry, Cambridge, S. 236 – 257, 2009.
- BAST, U., ELWERT, T., MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F., THÜRIGEN, C., TREFFER, F.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben, Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz, Berlin, 26.-27.03.2012., Veröffentlicht in: Recycling und Rohstoffe, Bd. 5, S. 699 – 706, Hrsg. K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, Nietwerder, 2012.
- BHS-SONTHOFEN: Innovationen beim Kühlgeräterecycling. Erschienen in: Sekundär-Rohstoffe, Ausgabe 9, S. 34-35, 2010.
- BURGSTALLER M.: Anwendungen von Chemical Imaging Kameras zur Inline-Sortierung von Kunststoffen in der Recycling Industrie; Arbeitskreis Prozessanalytik in der GDCh-Fachgruppe Analytische Chemie und in der DECHEMA, 6. Kolloquium; 2010.
- CHU S.: Critical Materials Strategy, Diane Publishing Books, Collingdale, 2011.

- DITTMAYER R., KEIM W., KREYSA G., OBERHOLZ A.: Winnacker-Küchler. Chemische Technik: Prozesse und Produkte, Band 6 a: Metalle, 5. Auflage. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim, 2006.
- DUWE, C., GOLDMANN, D.: Stand der Forschung zur Aufbereitung von Shredder-Sanden, Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz, Berlin, 26.-27.03.2012., Veröffentlicht in: Recycling und Rohstoffe, Band 5, S. 495 – 506, Hrsg. K.-J. Thome-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, Nietwerder, 2012.
- EVK: Einsatz von Helios 1.7, 2.0 & 2.5 zur Sortierung von Schüttgütern Möglichkeiten und Grenzen der Nahinfrarot (NIR) Spektroskopie in der Sortiertechnik, Eigenveröffentlichung, 2006.
- EKA: Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH – Zahlen/Daten/Fakten, 2011.
- FAIST V., RAGOSSNIG A.: Optische Sortiertechnik – Innovative Einsatzfelder in der Abfallwirtschaft; Tagungsband Abfallforschungstage 2008, S. 36 – 46, Cuviller Verlag, Göttingen, 2008.
- FRIEDRICH B.: Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion-basierten Automobil-Batterien, Science Allemagne – Umweltschonende Technologien für den Automobilantrieb von morgen; Elektromobilität, Wasserstoff und Brennstoffzellen, Deutsche Forschungsprojekte und –ansätze. Das Informationsblatt, 2009.
- HAGELÜKEN C.: Recycling of Electronic Scrap at Umicore’s Integrated Metals Smelter and Refinery, World of Metallurgy – Erzmetall, 59. Jahrgang, Heft 3, S. 152 – 161, GDMB Informationsgesellschaft mbh, Clausthal-Zellerfeld, 2006.
- HAGELÜKEN C.: Edelmetallrecycling – Status und Entwicklungen, Sondermetalle und Edelmetalle, Heft 121, Vorträge beim 44. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB, Clausthal-Zellerfeld, 2010a.
- HAGELÜKEN C., MESKERS C.: Complex Life Cycles of Precious and Special Metals, Strüngmann Forum Report, Linkages of Sustainability, Strüngmann Forum Report, Volume 4, S. 163 - 197, MIT Press, Cambridge, 2010b.
- HENZELMANN T., MEHNER S., ZELT T.: Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamt, Dessau, 2007.
- HUANG K., GUO J., Xu Z.: Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China, Journal of Hazardous Materials, Volume 164, Issues 2–3, S. 399 – 408, 2009.

- IVU-RICHTLINIE: Richtlinie 2008/1/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2008 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung.
- KAMBEROVIC Ž., KORAC M., IVSIC D., NIKOLIC V., RANITOVIC M.: Hydrometallurgical Processes for Extraction of Metals from Electronic Waste-Part I: Material Characterization and Process Option Selection, Journal Metallurgical & Materials Engineering, Volume 15, Issue 4, S. 231 – 243, 2009.
- KAMBEROVIC Ž., KORAC M., IVSIC D., RANITOVIC M.: Hydrometallurgical Processes for Extraction of Metals from Electronic Waste-Part II: Development of the processes for the recovery of copper from printed circuit boards (PCB), Journal Metallurgical & Materials Engineering, Volume 17, Issue 3, S. 139 – 149, 2011.
- KOCH W.: Entwicklung eines thermisch-chemischen Prozesses zur Verwertung von Abfällen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten - die „Haloclean“-Pyrolyse, Dissertation am Institut für Technische Chemie am Forschungszentrum Karlsruhe, 2007.
- KRANERT M., CORD-LANDWEHR K.: Einführung in die Abfallwirtschaft, 4. Auflage, Vieweg+ Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- KRAINDL G.: Herausforderungen der NIR-Sortierung von gemischten Abfällen aus Industrie und Gewerbe, DepoTech 2010, Tagungsband zur 10. DepoTech-Konferenz, Eigenverlag, Leoben, S. 249 – 256, 2010
- KULCKE A., STRANGL S., BURSTALLER M.: 2D NIR Spektroskopie und materialelektive, induktive Metallerkennung im Recycling: Technologie und Praxisbeispiele, Heft 114: Sensorgestützte Sortierung 2008, Tagungsband, 2008
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten, LANUV-Fachbericht 38, 2011.
- LEHNER T.: E&HS aspects on metal recovery from electronic scrap. ISEE '03 Proceedings of the Electronics and the Environment. Washington, 2003
- LEITNER, T.: Die Zukunft des Austauschs von Nachhaltigkeitsdaten entlang der Zulieferkette, Vortrag Workshop 2a „Öko Design“ Zukunftsakademie OÖ, 2012
- LUDA M.: Recycling of Printed Circuit Boards; Integrated Waste Management - Volume II, InTech, Rijeka, S. 285 – 298, 2011
- NASSOUR, A.: Abfallwirtschaft – Technologie und Recycling, Universität Rostock, Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft, 2006.

- NELSON R.: Innovation. International Encyclopedia of the Social Sciences, Vol. VII, Macmillan, New York, 1968.
- MARTENS, H.: Recyclingtechnik – Fachbuch für Lehre und Praxis, 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011.
- MAURELL-LOPEZ S., AYHAN M., ESCHEN M., FREIDRICH B: Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott, Recycling und Rohstoffe, Band 5, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2012.
- MENAD, N., GUIGNOT, S., VAN HOUWELINGEN, J.A.: New Characterization method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE). Waste Management, In Press, Corrected Proof, 2012.
- MERKEL C., FRIEDRICH B.: Rückgewinnung von Sondermetallen aus Produktionsabfällen für die Elektronikindustrie, Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Band 1, 2. Auflage, Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2011.
- PRADHAN J., KUMAR S.: Metals bioleaching from electronic waste by Chromobacterium violaceum and Pseudomonads sp, Waste Management & Research, Volume 32, Issue 1, S. 3 – 18, 2012.
- REDONDO E., FISER M.: WEEE Trace Project-Full Traceability of the management of WEEE; Vortrag im Cluster Workshop on “Sensor based Sorting Technologies and Applications” 17. – 19.04 in Aachen, 2012.
- ROHS-RICHTLINIE: Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, 2011.
- SCHLUEP M., HAGELUEKEN C., KUEHR R., MAGALINI F., MAURER C., MESKERS C., MUELLER E., WANG F.: Recycling - From E-Waste to Resources, Sustainable Innovation and Technology Transfer, Industrial Sector Studies, Prepared for United Nations Environment Programme, Paris, 2009.
- SCHUMPETER, J.A.: The Creative Response in Economic History. The Journal of Economic History Volume 7, No. 2, S. 149-159, 1947.
- SOHAILI J., SHANTHA K., MUNIYANDI S., MOHAMAND S.: A Review on Printed Circuit Boards Waste Recycling Technologies and Reuse of Recovered Nonmetallic Materials, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, Volume 3, Number 1, S. 12 – 18, 2012.
- SOHN H.: Hydrometallurgical Principles, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Volumes 1-11, 2nd Edition, Elsevier, New York, 2001.

STEINERT: STEINERT-Nichteisenmetallscheider werden immer breiter, immer effizienter; Pressemeldung 2007.

SUNDQVIST R.: Rönnskär - a smelter in change. Firmenpräsentation 2013

TESAR M., ÖHLINGER A.: Elektroaltgerätebehandlung in Österreich – Zustandsbericht 2008, REP-0199, Umweltbundesamt Wien, Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2009.

UMICORE: Inauguration of battery recycling facility in Hoboken; Press release CP-2011-35; Brüssel 2011.

TANGE L.; VAN HOUWEKINGEN J.A.; HOFLAND W.; SALEMIS P.: Recycling of plastics with flame retardants of electronic waste, a technical and environmental challenge for a sustainable solution; Proceeding Electronics Goes Green 2012+ (EGG), Fraunhofer Verlag, Berlin, 2012.

TREFFER F., HOLZÄPFEL, M. ; GOLDMANN, D., BUCHERT, M.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRI, BMBF-Forschungsbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2011.

VAHS D., BURMESTER R.: Innovationsmanagement. Von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung, 3. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2005.

WEEE-RICHTLINIE: Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, 2003.

WEISS M., FELBER J.: REDWAVE XRF Röntgenfluoreszenzverfahren für Wertstoffsartierung in der Abfallwirtschaft, DepoTech 2010, Tagungsband zur 10. DepoTech-Konferenz, Eigenverlag, Leoben, 2010.

ZEIGER E.: Sortierung verschiedener Abfallströme mit Mogensen-Röntgensortiertechnik, AT Aufbereitungs Technik – Mineral Processing Ausgabe 3, 2006.

Onlinequellen:

BHS: www.bhs-sonthofen.de; Zuletzt besucht am 01.04.2012

E-AIMS: www.eaims-project.com; Zuletzt besucht am 13.05.2012

FRAUNHOFER(a):

http://www.ivv.fraunhofer.de/load.html?/mainframes/germany/business/gf_kr_poly-ressource.html ; Zuletzt besucht am 13.02.2012

FRAUNHOFER(b):

http://www.ivv.fraunhofer.com/load.html?/mainframes/germany/business/gf_kr_recyclate.html; Zuletzt besucht am 16.12.2012

IFE-BULK: www.ife-bulk.com; Zuletzt besucht am 12.02.2012

KERP: www.kerp.at; Zuletzt besucht am 30.12.2012

REWARD: www.reward-weee.eu; Zuletzt besucht am 15.05.2012

SAT-RESEARCH: www.sat-research.at; Zuletzt besucht am 30.12.2002

SATURN: www.saturn.rwth-aachen.de; Zuletzt besucht am 15.05.2012

STARMAG: www.starmag.ch; Zuletzt besucht am 14.04.2012

STEINERT: www.steinert.de; Zuletzt besucht am 11.02.2012

TIAF: www.tiaf.de/wag2.htm; Zuletzt besucht am 08.04.2012

TITECH: www.titech.com; Zuletzt besucht am 22.04.2012

UHF RECYCLING: <http://media.ufhrecycling.at/files/ufh/831.pdf>; Zuletzt besucht am 13.08.2013

WEEE TRACE: www.weee-trace.eu; Zuletzt besucht am 14.05.2012

WAGNERMAGNETE: <http://www.wagnermagnete.de/pdf/4/L0421d.pdf>; Zuletzt besucht am 08.04.2012

WKÖ:

http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?angid=1&stid=687503&dstid=0&titel=Neue%2cElektroaltger%C3%A4te-Richtlinie%2cver%C3%B6ffentlicht ; Zuletzt besucht am 22.12.2012

ZAUG RECYCLING: <http://www.zaugrecycling.de/kuehlgeraete/>; Zuletzt besucht am 13.08.2013