

Auftraggeber

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft
Umwelt und Wasserwirtschaft
Sektion III U
Stubenbastei 5
1010 Wien

**VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR
AUSGEWÄHLTE FRAKTIONEN
AUS DER DEMONTAGE VON
ELEKTROALTGERÄTEN
Kunststoffe**

Wien, im Mai 2001

**Verwertungsmöglichkeiten für ausgewählte Fraktionen
aus der Demontage von Elektroaltgeräten
Kunststoffe**

Elisabeth Novak

Wien, im Mai 2001

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG.....	K1
I. EINLEITUNG	1
I.1 PROJEKT	1
I.2 INHALTE UND ZIELE DER STUDIE.....	1
I.3 ANGESTREBTE ERGEBNISSE	2
II. ABFALLSTROM ELEKTROALTGERÄTE	3
II.1 GESAMTAUFKOMMEN EAG	3
II.2 KUNSTSTOFFE IN EAG.....	6
III. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN.....	9
III.1 ALLGEMEINES ZUR KUNSTSTOFFVERWERTUNG	9
III.2 STOFFLICHE VERWERTUNG	10
III.2.1 ALLGEMEINES	10
III.2.2 VERFAHREN	10
III.2.3 SORTIEREN VON KUNSTSTOFFEN.....	12
III.2.4 TRENNUNG ÜBER SELEKTIVES LÖSEN	12
III.2.5 TRENNUNG ÜBER SELEKTIVES ERWEICHEN	15
III.3 ROHSTOFFLICHE ODER CHEMISCHE VERWERTUNG	18
III.3.1 ALLGEMEINES	18
III.3.2 VERFAHREN UND BEISPIELE	18
III.4 THERMISCHE VERWERTUNG	20
III.4.1 ALLGEMEINES	20
III.4.2 VERFAHREN UND BEISPIELE	21
IV. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN AUS EAG	24
IV.1 STOFFLICHE VERWERTUNG.....	24
IV.1.1 KRITISCHE ADDITIVE	24
IV.1.1.1 Flammenschutzmittel	24
IV.1.1.2 Schwermetalle.....	29
IV.1.2 PRAXIS DER STOFFLICHEN VERWERTUNG	31
IV.1.2.1 Sortenreines Mahlgut aus Haushaltskleingeräten.....	32
IV.1.2.2 Sortenreines Polystyrolmahlgut aus Kühlgeräten	40
IV.1.2.3 Firma: ABS-Regranulat für Herstellung von TV-Gehäusen Sysplast®	42
IV.1.2.4 Perspektiven für die stoffliche Verwertung.....	47
IV.1.3 ROHSTOFFLICHE VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN AUS EAG	53
IV.1.3.1 Hydrierung	53
IV.1.3.2 Synthesegas/Methanolherstellung	53
IV.1.3.3 Indirekte Verfahren zur rohstofflich/thermischen Verwertung	55
IV.1.3.3.1 Metallurgisches Verfahren	55

IV.1.4	THERMISCHE VERWERTUNG	58
IV.1.4.1	Pyrolyse	58
IV.1.4.2	Verbrennung	62
II.1.1.1	Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen	64
II.1.1.2	Einsatz in industriellen Feuerungsanlagen	66
V.	KUNSTSTOFFVERWERTUNG AUS EAG IN ÖSTERREICH	67
V.1	RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	67
V.1.1	ÖSTERREICH	67
V.1.1.1	Deponieverordnung	67
V.1.1.2	Richtlinie zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten	67
V.1.1.3	Bundesabfallwirtschaftsplan	67
V.1.2	EUROPÄISCHE UNION	67
V.1.2.1	Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von EAG	67
V.2	VERFÜGBARE MENGEN	69
V.3	STOFFLICHE VERWERTUNG	76
V.4	THERMISCHE VERWERTUNG IN ÖSTERREICH	79
VI.	ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE ASPEKTE VERSCHIEDENER VERWERTUNGSWEGE FÜR KUNSTSTOFFE AUS EAG	80
VI.1	ÖKOLOGISCHE ASPEKTE	80
VI.1.1	ÖKOBILANZIELLE UNTERSUCHUNG VON KUNSTSTOFFVERWERTUNGSVERFAHREN ...	81
VI.2	ÖKONOMISCHE ASPEKTE	82
VI.3	ÖKOLOGISCH/ÖKONOMISCHE ASPEKTE	83
VII.	ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE	86
VIII.	LITERATURVERZEICHNIS	87

KURZFASSUNG

I. EINLEITUNG

Ziel der Studie

Das Ziel der Studie war es, Verfahren und Technologien für die Verwertung der aus der Demontage von Elektroaltgeräten anfallenden Kunststoffe zu erheben und vorzustellen, sowie realistische Wege und Möglichkeiten für die zukünftige Verwertung von Kunststoffen aus EAG in Österreich aufzeigen.

Angestrebte Ergebnisse

Darstellung der für eine Verwertung von Kunststoffen aus EAG verfügbaren Verfahren in Österreich und den Nachbarländern unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte.

Darstellung des gegenwärtigen und zukünftigen Potenzials an Kunststoffen aus EAG unter Berücksichtigung verschiedener Kunststoffarten, verschiedener Geräte und Gerätegruppen sowie Änderungen in der Materialzusammensetzung von Elektrogeräten

Abschätzung der Kunststoffströme aus EAG, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen kurzfristig für eine Verwertung in Frage kommen.

Abschätzung der Kunststoffströme aus EAG, die mittelfristig verwertbar sind, unter Berücksichtigung eines steigenden Kunststoffanteils in EAG, neuer Materialien und Additive, technischer Entwicklungen im Bereich Sortierung, Demontage und Aufbereitung sowie geänderter abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

II. ABFALLSTROM ELEKTROALTGERÄTE

Gesamtaufkommen an EAG

Der Begriff Elektroaltgeräte (EAG) steht für eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte, die unter den Gesichtspunkten der Erfassung, der Behandlung und der Verwertung zu Gerätekategorien bzw. -gruppen zusammengefasst werden. Derzeit erfolgt diese Kategorienbildung europaweit noch unterschiedlich. Im Zusammenhang mit der vorgesehenen EU-Richtlinie über Elektro- und Elektronikgeräte ist eine einheitliche Regelung zu erwarten. In Österreich erfolgt die Gerätezuordnung derzeit gemäß ÖNORM S 2106, in der gegenwärtigen Praxis der Sammlung und Aufbereitung hat sich aber folgende, einfache und verwertungsbezogene Einteilung etabliert:

Großgeräte: Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Herde u.ä.

Kleingeräte: Haushaltsgeräte, braune Ware, Büro-/IT-Technik, Werkzeuge, Spielzeug

Bildschirmgeräte: TV-Geräte, Monitore

Die Menge an Elektroaltgeräten, die jährlich als Abfall entsorgt werden, verteilt sich auf verschiedene Abfall- bzw. Altstoffströme und lässt sich nur abschätzen. Das Abfallpotenzial wird europaweit mit 10 - 20kg/EW abgeschätzt. Der große Streubereich ist auf verschiedene Annahmen für Gerätegewichte, unterschiedliche Definitionen für EAG und unterschiedliche Ausstattungsgrade des privaten und industriellen Bereiches in verschiedenen Ländern zurückzuführen.

Abschätzungen gehen für Österreich von einer derzeit anfallenden EAG-Menge von mindestens 100.000 t/a aus. Die Umrechnung gesamteuropäischer Daten zum Abfallaufkommen aus diesem Bereich ergibt für Österreich bereits für 1995 eine geschätzte Abfallmenge von 120.000 t (18,19,38). Die Verteilung von EAG auf die Bereiche Konsum- und Investitionsgüter wird im allgemeinen mit 60:40 angenommen.

Tabelle 1: Abschätzung des spezifischen Mengenpotenzials an EAG in Österreich

Jahr	Gesamt EAG t/a	Konsumgüter t/a	spez. Konsumgütermenge kg/EW.a
1990	80.000	48.000	6,0
1998	101.342	60.804	7,6
1999	104.382	62.629	7,8
2000	107.513	64.508	8,1
2001	110.739	66.443	8,3
2002	114.061	68.437	8,6
2003	117.483	70.490	8,8
2004	121.007	72.604	9,1

2005	124.638	74.782	9,3
------	---------	--------	-----

Quelle: Salhofer (36)

Kunststoffe in EAG

Der Kunststoffanteil in Elektro- und Elektronikgeräten liegt im Durchschnitt bei ca. 20%. Die Bandbreite reicht je nach Gerätegruppe von 5 – 50%, in einzelnen Geräten wie z.B. Telefonen erreichen Kunststoffe bereits einen Gewichtsanteil von 80%. Generell ist ein Ansteigen des Kunststoffgehaltes in EAG zu beobachten.

Daten betreffend den Kunststoffeinsatz in Elektro- und Elektronikgeräten sind für die letzten 2 Jahrzehnte auf europäischer Ebene verfügbar und erlauben eine Abschätzung der in EAG zu erwartenden Kunststoffmengen.

*Tabelle 2: Entwicklung des Kunststoffanteils in Elektro- und Elektronikgeräten in Westeuropa.
Absoluteinsatzmengen in 1000 t/a, Gewichtsanteile in %*

	1980		1992		1995		2000*	
	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%
Haushaltsgeräte groß (Weiße Ware)	295	15	478	20	528	21	656	24
Unterhaltungselektronik (Braune Ware)	43	10	241	28	233	26	265	26
Informationstechnologie	3	10	86	16	113	16	198	18
Bürotechnik	3	7	34	10,5	39	10,5	54	12
Haushaltsgeräte klein	38	19	92	32	107	35	118	35
Telekommunikation	22	40	57	58	62	58	72	58
Medizintechnik	1	2	4	3	4	3	4	3
Elektrotechn. Anlagen	74	5	158	6	173	6,5	191	6,5
Kabel	403	25	690	25	870	25	995	25
Kunststoffeinsatz	882		1.840		2.130		2.550	
Kunststoffanteil	15,3		18,6		19,1		20	
Gesamtproduktion	5.770		9.880		11.150		12.750	

*Quelle: SOFRES (37);*Daten 2000 Prognose*

III. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN

Für die Verwertung von Kunststoffen bieten sich grundsätzlich drei Wege an, die sich sowohl hinsichtlich der angewandten Verfahrenstechnik, der Art und Qualität der gewonnenen Sekundärmaterialien als auch im Verwertungsgrad unterscheiden.

- Die stoffliche oder werkstoffliche Verwertung
- Die rohstoffliche oder chemische Verwertung
- Die thermische Nutzung/Verwertung

Stoffliche Verwertung

Kennzeichnend für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen ist die Anwendung ausschließlich mechanischer und physikalischer Prozesse, wodurch der chemische Aufbau und die Molekülstruktur der Kunststoffe und damit auch ihre Eigenschaften erhalten bleiben. Als Output liefert die stoffliche Verwertung Mahlgüter oder Regranulate. Während Mahlgüter nur durch Zerkleinern, Trennen, Waschen und Trocknen entstehen, beinhaltet die Regranulatherstellung als zusätzlichen Verarbeitungsschritt ein Aufschmelzen und Granulieren der Kunststoffe. Die wesentliche Voraussetzung für die stoffliche Verwertung ist eine Sortierung des Inputmaterials nach Kunststoffarten, sowohl im Fall der Mahlgütherstellung als auch der Granulatproduktion. Die Gründe dafür liegen in der schlechten chemischen Verträglichkeit verschiedener Kunststoffarten und ihren unterschiedlichen Schmelztemperaturen.

In der Praxis erfolgt die Sortierung von Kunststoffabfallgemischen heute immer noch überwiegend manuell, durch **Handklauben**. Die Sortierkriterien sind in der Regel produktbezogen und so gewählt, dass mit der Erfassung eines Produktes auch die Erfassung eines Kunststoffes einhergeht. Im Verpackungsbereich sind auf diese Weise ausreichend sortenreine Fraktionen zugänglich. Vereinzelt wird die Handklaubung auch für die Sortierung von Kunststoffen aus technischen Anwendungsbereichen wie dem E & E-Bereich oder dem Automobilbau angewandt. Im Gegensatz zur Verpackungssortierung ist dabei aber aufgrund der weit größeren Sorten- und Teilevielfalt ein höheres Maß an Wissen und/oder Erfahrung des Sortierpersonals notwendig. Praxistaugliche automatische Identifizierungs- und Sortieranlagen auf der Basis von **Nah-Infrarot-Spektroskopie** sind speziell für die Verpackungssortierung schon im Einsatz. Für die Sortierung von technischen Kunststoffen sind diese Anlagen nicht anwendbar, da die Nah-Infrarot-Spektroskopie nicht zur Identifizierung von dunkel eingefärbten Kunststoffen, wie sie im technischen Bereich häufig zu finden sind, geeignet ist. Für die recyclinggerechte Sortierung technischer Kunststoffe ist zusätzlich die Erkennung und Unterscheidung von Füllstoffen und Additiven notwendig.

Im Labor- und Pilotmaßstab stehen geeignete Sortieranlagen zur Verfügung, der entscheidende Entwicklungsschritt zur praktischen Einsatztauglichkeit muss noch erfolgen. Für die Identifizierung der Kunststoffe kommen Mittel-Infrarot-Spektroskopie, Laser-Puls-Thermographie oder Laser induzierte Plasma-Spektroskopie in Frage, letztere eignet sich auch für die Additiverkennung.

Die Trennung von Kunststoffgemischen über selektives Lösen ist Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsprojekten. In diesem Fall soll die unterschiedliche Löslichkeit verschiedener thermoplastischer Kunststoffe in organischen Lösungsmitteln zur Trennung genutzt werden. Trotz erfolgversprechender Verfahrensentwicklungen im Technikums- und Pilotmaßstab, darunter auch ein von der Deutschen Gesellschaft für Kunststoff-Recycling GmbH (DKR), gemeinsam mit der TU Berlin und einem Anlagenbauer in Frankfurt entwickeltes Verfahren zur Herstellung von Polyolefin-Blends aus Mischkunststoffen, steht der Praxiseinsatz noch aus.

Das unterschiedliche Verhalten verschiedener thermoplastischer Kunststoffe beim Erwärmen wird ebenfalls als mögliche Basis eines Sortier- und Trennverfahrens für Mischkunststoffe untersucht. Dieses Verfahrenskonzept möchte die bei der Erweichung von Kunststoffen eintretende Änderung des physikalischen Verhaltens zur Abtrennung einzelner Kunststoffe nutzen.

Rohstoffliche Verwertung

Die rohstoffliche oder chemische Verwertung von Kunststoffen führt über den chemischen Abbau der Makromoleküle zu niedermolekularen chemischen Grundstoffen. In Abhängigkeit vom angewandten Verfahren handelt es sich bei den gewonnenen Sekundärrohstoffen um Gemische gasförmiger und/oder flüssiger Kohlenwasserstoffe. Für Polykondensate wie z.B. Polyester oder Polyamide und Polyaddukte wie z.B. Polyurethane ist auch eine gezielte Rückspaltung in die für ihre Herstellung eingesetzten Monomere möglich.

An technischen Verfahren stehen für die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen die klassischen Konversionsverfahren der Erdöl- und Kohlechemie zur Verfügung: Die Hydrierung, die Vergasung (Herstellung von Synthesegas) und mit Vorbehalten auch die Pyrolyse. Für die gezielte Rückspaltung in Monomere bieten sich die Hydrolyse bzw. Alkoholyse an.

Die **Hydrierung** basiert verfahrenstechnisch auf dem sogenannten „Bergius-Pier-Verfahren“ das ursprünglich zur Kohleverflüssigung, später auch für die Aufarbeitung von Raffinerierückständen zum Einsatz kam. In

einem Sumpfphasenreaktor werden die jeweiligen Einsatzstoffe durch Behandlung mit Wasserstoff bei Temperaturen von 400-500°C und einem Druck von 150-250 bar zu einem Gemisch flüssiger Kohlenwasserstoffe, einer Art „synthetischem Rohöl“ konvertiert.

Die **Vergasung** von kohlenstoffhaltigen Materialien zur Gewinnung von Synthesegas hat ihren Ursprung ebenfalls in der Kohlechemie. Als Vergasungsmittel dienen Sauerstoff oder Luft und Wasserdampf. Für Synthesegas stehen als Verwendungsoptionen die Weiterverarbeitung zu Methanol, die Erzeugung von Wasserstoff oder der Einsatz als Brenngas zur Verfügung. Je nach angewandter Vergasungstechnologie und Einsatzzweck des gewonnenen Synthesegases ist die Vergasung als rohstoffliches, thermisches oder rohstofflich/thermisches Verwertungsverfahren zu beurteilen.

Sowohl für die Hydrierung als auch für die Vergasung eignen sich alle Kunststoffe und eine Sortierung ist nicht notwendig. Füllstoffe, Pigmente und auch Halogene stören die Prozesse nicht. Beide Verfahren haben ihre Eignung zur Verwertung von Kunststoffen in der Praxis unter Beweis gestellt. Im **Sekundärverwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ)** können jährlich ca. 140.000 t Kunststoffabfälle aus verschiedenen Einsatzbereichen gemeinsam mit Kohle und anderen Abfallstoffen für die Herstellung von Synthesegas und Methanol genutzt werden. Derzeit kommen vornehmlich Mischkunststoffe aus der Verpackungssammlung zum Einsatz.

In der **Kohlehydrieranlage in Bottrop** wurden von 1994 bis Ende 1999 jährlich 60.000-80.000 gemischte Verpackungskunststoffe zu Syncrude hydriert, ein Probebetrieb mit Kunststoffabfällen aus EAG verlief positiv. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde die Anlage allerdings vorzeitig stillgelegt (12/1999). Trotz hoher Produktqualität und positiver ökologischer Bewertung konnte das Verfahren gegen alternative Verfahren wie z.B. den Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen oder die Synthesegasherstellung nicht bestehen.

Bei der **Hydrolyse** bzw. **Alkoholyse** werden Polykondensate und Polyaddukte durch gezielte Einwirkung von Wasser oder Alkoholen in die für ihren Aufbau eingesetzten Monomere rückgespalten. Die Verfahren stellen sehr hohe Ansprüche an die Sortenreinheit und Sauberkeit des Inputmaterials und zeichnen sich durch sehr hohe Anlagenkosten aus. Sie sind nur bei sehr hohen Durchsatzmengen und einheitlichen Abfallströmen rentabel zu betreiben. Praktische Erfahrung mit der Hydrolyse bzw. Alkoholyse liegen für PET, Polyurethane und Polyamide vor. In den USA wird die Hydrolyse von PET-Flaschen aus dem Verpackungsbereich seit ungefähr 10 Jahren in größerem Umfang durchgeführt.

Thermische Verwertung

Die thermische Verwertung von Kunststoffabfällen hat die Nutzung ihres vergleichsweise hohen Heizwertes zum Ziel, der je nach chemischer Zusammensetzung zwischen 42 und 18 MJ liegt.

Als Verfahren kommen die Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen mit angeschlossener Nutzung der Verbrennungswärme, die (Mit)Verbrennung in industriellen Feuerungsanlagen als Zusatz- bzw. Ersatzbrennstoff und die Pyrolyse bzw. Vergasung mit anschließender Verbrennung der gewonnenen Stoffe und Nutzung der Verbrennungswärme in Frage.

Die thermische Nutzung von Kunststoffen als Bestandteil des Inputs von Hausmüll- oder Restmüllverbrennungsanlagen ist Stand der Technik. Derzeit liegt der Kunststoffanteil im Input derartiger Anlagen zwischen 10 und 15%. Steigerungen sind in einem gewissen anlagenspezifischen Ausmaß ohne große Schwierigkeiten zu verkräften. Der mit zunehmender Kunststoffmenge steigende Heizwert erfordert Anpassungen im Anlagenbetrieb, z.B. in der Verbrennungsluftführung, der Rostgeschwindigkeit und der Rostbeschickung. Bei Emissionen und Reststoffen zeigen sich keine signifikanten Abweichungen vom „Normalbetrieb“, mit Ausnahme eines erhöhten Halogenwasserstoffgehaltes im Rohgas beim Einsatz halogenhaltiger Kunststoffe. Da gemischte Kunststoffabfälle in der Regel auch halogenhaltige Kunststoffe enthalten, ist dieser Effekt oft zu beobachten. Auf die Emissionswerte im Reingas zeigen die erhöhten Rohgaswerte keinen Einfluss, sie führen zu einer Erhöhung der Salzfracht im Abwasser und mitunter zu einem erhöhten Bedarf an Neutralisationsmittel und einer Erhöhung der Reststoffmenge. Die Konzentration an halogenierten Dioxinen und Furanen im Rohgas bleibt - trotz erhöhtem Halogenwasserstoffgehalt- unbeeinflusst. (Das bestätigt die wesentliche Rolle, die der richtigen Dimensionierung des Feuerraumes und der richtigen Feuerungsführung zukommt).

Der Verwendung von Altkunststoffen als Zusatz- und Ersatzbrennstoff in industriellen Feuerungsanlagen hat im Zusammenhang mit der Frage nach Alternativen für die Verwertung stofflich schlecht verwertbarer Kunststoffverpackungen stark an Bedeutung gewonnen. Um als Ersatzbrennstoff tauglich zu sein, müssen Kunststoffabfälle definierte Brennparameter wie z.B. Heizwert, Lagerfähigkeit, Stückigkeit, Dosierbarkeit, Asche- und Feuchtigkeitsgehalt, Halogen-, Schwefel-, Schwermetallgehalt usw. aufweisen. Die erforderliche Brennstoffqualität ist anlagen- und prozessspezifisch und die Anforderungen sind unter dem Gesichtspunkt zu definieren, dass weder die Emissionssituation noch das Produkt durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen nachteilig beeinflusst werden dürfen. In der Praxis kommen derzeit Mischkunststofffraktionen aus der Verpackungssammlung als Ersatzbrennstoff in der Zementproduktion zum Einsatz.

IV. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN AUS EAG

Stoffliche Verwertung

Eine stoffliche Verwertung von Kunststofffraktionen aus dem Bereich der EAG ist ungleich schwieriger zu realisieren als etwa im Verpackungsbereich. Sie findet daher sowohl in Österreich als auch im benachbarten Ausland nur in geringem Ausmaß und in Einzelfällen statt. Im Regelfall werden die bei der üblichen mechanischen Aufarbeitung von EAG anfallenden Kunststoffe entweder deponiert oder in Abfallverbrennungsanlagen genutzt.

Kritische Additive

Kritisch im Zusammenhang mit der stofflichen Verwertung der Kunststoffe aus EAG ist ihr möglicher Gehalt an halogenierten Flammschutzmitteln sowie an Schwermetallen wie Cadmium, Blei, Kupfer, Zink und Antimon.

Die aus Gründen der Produktsicherheit vorgeschriebenen Brandeigenschaften vieler Geräte und -teile sind nur unter Verwendung flammhemmend ausgerüsteter Kunststoffe erfüllbar. Zu den Haupteinsatzgebieten für flammgeschützte Kunststoffe zählen Fernsehgeräte, Geräte der EDV und Bürotechnik sowie „innere“ Bauteile wie Leiterplatten, Steckverbindungen, Fassungen u.ä.

Für die Flammfestausrüstung von Kunststoffen stehen verschiedene Additive zur Verfügung, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem Wirkungsmechanismus unterscheiden. Mit einem Weltmarktanteil von fast 40% stellen bromhaltige organische Verbindungen die wichtigsten Flammschutzmittel dar. Dies ist auf ihre hohe Wirksamkeit und ihr sehr gutes Preis/Leistungsverhältnis zurückzuführen. 56 % aller bromierten Flammschutzmittel werden für elektrische und elektronische Geräte verwendet.

Die Verwendung bromierter Flammhemmer ist umstritten und in Europa sind Verwendungsbeschränkungen bzw. Verbote in Diskussion. Die Bedenken stehen im Zusammenhang mit dem Verdacht der Bioakkumulation und der Bildung von Dioxinen und Furanen beim Erhitzen und Verbrennen. Beides wurde für einzelne Vertreter dieser Verbindungsklasse nachgewiesen. Für manche der verwendeten Stoffe ist ein hormonelles Aktivitätspotenzial nicht ausgeschlossen. Die Abschätzung der tatsächlichen Gefährdung für Mensch und Umwelt ist aufgrund der Komplexität der Wirkungen schwierig.

Bei der stofflichen Verwertung der Kunststoffe sind bromierte Flammhemmer aus mehreren Gründen kritisch. Die Herstellung und Verwendung bromhaltiger Recyclate hält kritische Stoffe im Umlauf, wobei nicht auszuschließen ist, dass sie in Produkte gelangen, in denen sie bisher nicht zu finden waren. Der nur schwer vermeidbare „Verdünnungseffekt“ durch die gemeinsame Verarbeitung von bromhaltigen und nicht bromhaltigen Regranulaten erschwert eine spätere Ausschleusung dieser Stoffe aus der Umwelt beträchtlich.

Da die Dioxinbildung bereits bei der Granulierextrusion eintreten kann, besteht die potenzielle Gefahr der Herstellung dioxinhaltiger Recyclate.

Für die Praxis des Recyclings bedeutet das, dass es eine Unterscheidung in bromhaltige und bromfreie geben muss. Heute geschieht das Aussondern flammenschutzmittelhaltiger Teile aufgrund von Erfahrung: Man weiß beispielsweise, dass Fernsehgehäuse und Gehäuse von EDV-Geräten in der Regel flammhemmend ausgerüstet sind.

Tabelle 3: Flammschutzmittel in verschiedenen Gehäusewerkstoffen

Nr.	Kunststoff / Flammschutzmittel	Gesamtanteil (%) 228 Proben	Anteil Fernsehgehäuse (%) 111 Proben	Anteil PC-Monitore (%) 117 Proben
1	PS-HI / Deca-DPE	10,5	13,5	7,7
2	PS-HI / OBB*	4,4	9,9	0
3	PS-HI / HBDE	2,2	0,0	3,4
4	PS-HI ohne Flammschutz	17,5	28,8	6,8
5	ABS / TBBPA	8,8	0	17,1
6	ABS / TBBPA carbonatoligomer	0,9	0	1,7
7	ABS / Octa-DPE	11,8	16,2	7,7
8	ABS / TBPE**	8,3	1,8	14,5
9	ABS ohne Flammschutz	10,5	8,1	12,8
10	PPO-PS (inhärent flammwidrig)	15,4	7,2	23,1

11	Andere	9,6	14,4	5,1
----	---------------	-----	------	-----

* OBB = Octabrombiphenyl; ** TBPE= 1,2-Bis(tribromphenoxy)ethan

Im Hinblick auf die Verwertung sind auch die in Kunststoffen in Form von Pigmenten und Stabilisatoren enthaltenen Schwermetallverbindungen zu beachten. Das betrifft v.a. Cadmium, Zink, Blei und Antimon, das in Form von Antimontrioxid als Synergist gemeinsam mit bromierten Flammschutzmitteln verwendet wird. Für Cadmiumverbindungen existiert de facto ein Anwendungsverbot und sie sollten auch nicht über Recyclingmaterial in Produktkreisläufen verbleiben. Die Verwendung von Bleiverbindungen wird zunehmend kritisch gesehen, auch hier scheint ein Ausschleusen sinnvoll. Die Schwermetallbelastung von Kunststoffen aus technischen Einsatzbereichen ist generell höher einzustufen als jene aus dem Verpackungs- und Konsumartikelbereich.

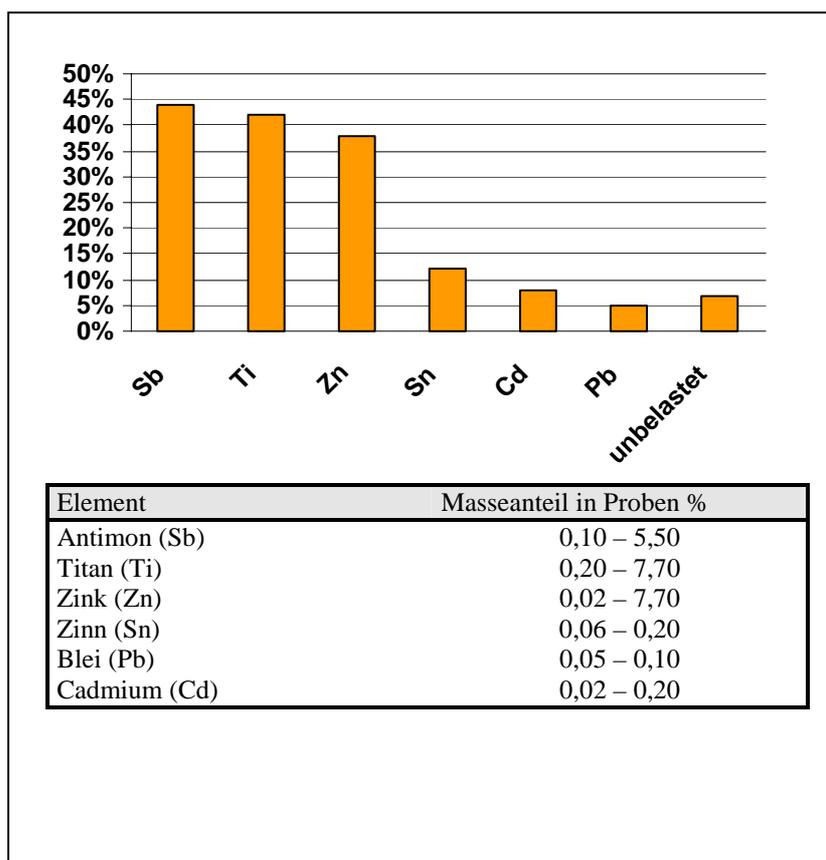


Abb .1 : Schwermetalle in Kunststoffabfallproben aus EAG

In der Praxis erfolgt der Ausschluss von Kunststoffen mit kritischen Schwermetallgehalten ähnlich wie im Fall der Flammschutzmittel aus Erfahrung. Im Fall von Cadmium geschieht das in der Regel über die Elimination von roten, gelben und braunen Teilen. Antimon wird bei der Aussonderung flammgeschützter Teile miterfasst.

Praxis der stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG

Die Praxis der stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG ist von Einzelinitiativen engagierter Unternehmen gekennzeichnet, die diesen Verwertungsweg umsetzen und versuchen aktiv weiterzuentwickeln. Die Aktivitäten konzentrieren sich v.a. auf den Bereich der Haushaltskleingeräte und zunehmend auf den Bereich IT- und Kommunikationstechnik. Im Gegensatz zu den Bereichen, in denen die stoffliche Verwertung von Kunststoffen bereits Fuß gefasst hat, wie etwa die Verpackung, vereinzelt auch bei Bauprodukten, liegen in EAG die Kunststoffe nicht als Produkte, sondern als Produktteile in oft komplizierten Materialverbunden vor, aus denen sie zunächst gelöst werden müssen. Erst im Anschluss an die Auflösung des Materialverbundes kann der „traditionelle“ Verwertungsprozess anschließen. Die Auflösung der Materialverbunde erfolgt entweder durch manuelle Demontage der EAG, was dem Stand der Technik entspricht, oder durch mechanische Aufbereitung.

Mechanische Aufbereitung

Die mechanische Aufarbeitung von EAG ist Stand der Technik, allerdings mit dem Ziel der Gewinnung möglichst reiner und hochwertiger Metallfraktionen. Durch passende Auswahl der Aufgabefraktionen, Verfahrensanpassungen und Anwendung zusätzlicher, spezieller Trenn- und Sortierschritte lassen sich aus der nach der Metallabtrennung verbleibenden Fraktion verwertbare Kunststofffraktionen mit einer Sortenreinheit von > 95% gewinnen.

Der erste für die Effizienz der Aufbereitung wesentliche Schritt ist die Auswahl des Aufgabegutes. Dabei werden Geräte ähnlicher Bauart und Stoffzusammensetzung v.a. hinsichtlich der enthaltenen Kunststoffe zu sogenannten „Verwertungsklassen“ zusammengefasst. Dieser Schritt sorgt einerseits dafür, dass die gewünschte Kunststoffzielfraktion in ausreichendem Maße im Aufgabegut vorhanden ist.

Die prinzipielle Funktionsweise der Verfahren beinhaltet als nächsten Schritt eine Vordemontage bzw. Vorkonditionierung der Geräte durch Entfernen von Kabeln, Batterien und schadstoffhaltigen Bauteilen. In der anschließenden sogenannten Trockenstrecke erfolgt die Trennung der Materialverbunde Metall/Kunststoff, die Zerkleinerung und die Sortierung des Materialstroms mit dem ersten Ziel der Abtrennung der Metallfraktionen. Nach dem Abtrennen der metallreichen Fraktionen und der Leichtfraktionen aus Papier, Folien u.ä., verbleibt eine kunststoffreiche Fraktion, gelangt in die „Nassstrecke“: Das zunächst auf eine Korngröße von < 10 mm zerkleinerte Material durchläuft eine Friktionswäsche, eine Schwimm/Sinktrennung, eine Sortierung auf einem Nassstoßherd, eine mechanische und thermische Trocknung und zuletzt eine Entstaubung. Diese Behandlung liefert als Produkt sortenreine Mahlgüter mit einer Reinheit von bis zu 99%.

Neben der richtigen Definition der Verwertungsklassen ist das schonende Trennen der Metall/Kunststoffverbunde ein wichtiges Kriterium für die Qualität des Verfahrens und der Endprodukte. Das Lösen der Materialverbunde wird daher in zwei Stufen durchgeführt: In einer Art Vorzerkleinerung mit Hilfe von Prallmühlen erfolgt zunächst eine Grobzerkleinerung. Dadurch werden Funktionsteile wie z.B. Heizplatten, Stecker, Schalter, Schläuche, Dichtungen usw. zugänglich und können durch Handsortierung entfernt werden. Erst in einem zweiten Schritt erfolgt die weitere Auflösung der Materialverbunde durch eine Zerkleinerung des Materials auf eine Korngröße von ca. 25 mm.

Die reinen Aufarbeitungskosten liegen je nach Gerätegruppe bei rund €250 /t Aufgabegut. Die Erlöse für das Kunststoffmahlgut bewegen sich für ABS zwischen €400 und 450 /t, für PP bei ca. €250-300/t. Die Kunststoffausbeute ist abhängig vom Aufgabegut, für die Verwertungsklasse „Staubsauger“ liegt sie z.B. bei 30% (ABS) für die Verwertungsklasse „Kaffeemaschine“ bei ca. 40% (PP) des Aufgabegutes.

Manuelle Demontage

Die händische Demontage von EAG entspricht dem Stand der Technik. Sie wird in unterschiedlicher Tiefe in der Praxis der EAG Aufbereitung und Verwertung angewandt. In der Regel dient sie zur Schadstoffentfrachtung, zum Ausbau von Bauteilen, wie z.B. Bildröhren, Leiterplatten, Kabeln, massive Metallteilen u.ä., die einer Wiederverwendung oder einer besonderen Aufbereitung/Verwertung zugeführt werden sollen, und zur Vorkonditionierung der Geräte für die mechanische Aufbereitung. Mit dem Ziel sortenreine Kunststofffraktionen zu erzielen, wird sie nur selten durchgeführt.

Ein Beispiel für die praktische Anwendung der manuellen Demontage zur Bereitstellung sortenreiner Kunststofffraktionen ist das Recyclingcenter der Fa. Grundig in Nürnberg, das sich intensiv mit der Entwicklung von Demontage-, Sortier- und Qualitätssicherungsprozessen für die Herstellung von Kunststoffrecyclaten beschäftigt.

Ähnlich wie im Fall der mechanischen Aufbereitung stellt die Auswahl der für die Herstellung eines definierten Recyclingwerkstoffes in Frage kommenden Geräte, bzw. Geräteteile einen entscheidenden Schritt dar. Grundig bezeichnet diesen Schritt als „Vereinnahmung“. Dabei erfolgt nach ersten Zerlegeschritten zur Abtrennung von Schad- und Störstoffen sowie einfach und schnell entfernbaren Wertstoffen, wie z.B. Netzkabeln, Antennen, Kassettenfächer, die Bildung von Zwischenlagerkategorien gemäß dem Prinzip der „Stoffgleichheiten“. Dabei werden Geräte sowohl nach Gerätetyp als auch nach verwendeten Materialien eingeteilt z.B. Fernsehgeräte mit Gehäusewerkstoff Holz. Dieser Schritt hat sich als sehr wertvoll im Hinblick auf die Effizienz der weiteren Arbeitsschritte erwiesen. Die anschließende Demontage und Sortierung erfolgen im Hinblick auf eine Zuordnung der Teile zu definierten Verwertungsebenen. Kunststoffteile bilden die Verwertungsebene 1, der amorphe Thermoplaste zugeordnet sind, und die Verwertungsebene 2, die teilkristalline Kunststoffe umfasst. Innerhalb der beiden Kunststoffgruppen wird anhand folgender Kriterien weiter differenziert:

Kunststoffsorte (Produkt): Identifizierung der Kunststoffsorten aufgrund von Kenntnissen/Erfahrung und einfachen Erkennungsmethoden wie z.B. Lösemitteltest, Bruchtest, Brennbarkeitstest u.ä.

Applikation: Trennung von Kunststoffteilen gleicher Sorte nach angewandtem Verarbeitungsverfahren, das an konkreten Teilen in der Regel leicht feststellbar ist. (Verschiedene Verarbeitungsverfahren erfordern unterschiedliches Verhalten der Kunststoffe in der Schmelze. Es gibt daher für an sich gleiche Kunststoffsorten Extrusionstypen, Spritzgusstypen usw.. Beim Recycling sollte das Verarbeitungsverfahren nach Möglichkeit gleich bleiben.)

Additive: Aussondern von cadmiumhaltigen Kunststoffteilen durch Farbsortierung, wobei die Farbgruppen Hellgelb bis Dunkelrot und Hellgrün bis Dunkelbraun ausgesondert werden. Ausschleusen von flammgeschützten Kunststoffteilen aufgrund von Erfahrung oder mithilfe einfacher Brennproben.

In Zweifelsfällen erfolgt eine endgültige Identifizierung von Kunststoffteilen innerhalb der bereits nach Sorten, Typen, sowie farblich getrennten Kunststofffraktionen unter Einsatz eines IR-Spektrometers. Die gebildeten Kunststofffraktionen werden zu Mahlgütern oder Regranulaten verarbeitet. Die Festlegung der Qualitätsanforderungen und der „Rezeptur“ erfolgt sinnvoll in Absprache mit dem Anwender.

Grundig übergibt Mahlgüter, die in der eigenen Produktion von Fernsehgehäusen nicht zum Einsatz kommen, an die Ursprungslieferanten oder verkauft sie auf dem Sekundärmarkt. Bei den Ursprungslieferanten (Rohstoffhersteller) finden diese Mahlgüter in der Regel Eingang in die Produktion sogenannter R-Typen und müssen definierten Qualitätsanforderungen wie Schmelzindex, Farbe, Korngröße, Staubgehalt usw. gerecht werden. Mahlgüter, die diese Anforderungen nicht erfüllen, werden verkauft und finden dann in weniger anspruchsvollen Produktsegmenten Verwendung.

Perspektiven für die stoffliche Verwertung

Die Praxis vor Ort zeigt sehr deutlich, dass für eine erfolgreiche stoffliche Verwertung der Aufbau von Netzwerken notwendig ist, die eine Zusammenarbeit möglichst vieler an einem Werkstoff- und/oder Produktkreislauf beteiligten Wirtschaftskreise sichert. Zu dem Ergebnis kommt auch eine vom Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) durchgeführte Machbarkeitsstudie über die Schließung von Produktkreisläufen (12). Die Studie modelliert ausgehend von Kunststoffabfällen aus EAG und dem Ziel, einen Bauteil aus Kunststoffrecyclat für den Einsatz in neuen Elektro-/Elektronikgeräten herzustellen, den Aufbau eines Recyclingnetzwerkes. Das IPA stützt sich auf Wissen und Erfahrungen aus der Praxis, berücksichtigt Forschungsergebnisse und bindet Erkenntnisse aus durchgeführten Projekten zur EAG-Verwertung ein. „Teilnehmer“ des Modells sind Produkthersteller, Demontagebetriebe, Aufbereitungsbetriebe, Verarbeitungsbetriebe und Logistikunternehmen.

Den ersten Schritt stellt die Auswahl der in Frage kommenden Kunststoffe und die Festlegung der verfügbaren Mengen und Lieferanten dar. Im nächsten Schritt erfolgt eine Auflistung von Bauteilen, für deren Her-

stellung die verfügbaren Kunststoffe grundsätzlich geeignet sind, und die Auswahl eines konkreten Bauteiles. Diese Entscheidung bildet die Basis für Festlegung der Anforderungen (Qualität und Kostenvorteile gegenüber Neuware!) an das Input-Material sowie die Zielvorgaben für die Demontage-, die Aufbereitungs- und Verarbeitungsbetriebe. Für die Umsetzung des Modells bieten sich als Alternativen der Aufbau von Verwertungslinien oder von Verwertungssinseln an.

Verwertungslinien führen alle Behandlungsschritte auf dem Weg zum qualitätsgesicherten Regranulat an einem Standort durch und sind bei den Systemkosten (Logistik und Behandlung) im Vorteil. Sie erfordern jedoch hohe Investitionskosten und sind wenig flexibel. Das Konzept Verwertungssinseln geht davon aus, dass sich verschiedene Betriebe auf einzelne Verfahrensschritte spezialisieren und im Rahmen eines Netzwerkes quasi „gemeinsam“ das qualitätsgesicherte Regranulat dem Produkthersteller liefern. Dieses Modell nutzt und fördert die Entwicklung regional vorhandener Kapazitäten und kann flexibel auf den Stand der Technik reagieren. Nachteilig sind die höheren Systemkosten. Eine modellhafte Kostenkalkulation ergibt bei einem Entsorgungspreis von €102/t für ein PP-Regranulat Systemkosten von €762/t. Bei einem angenommenen Neumaterialpreis von ca. €810/t beträgt der Kostenvorteil gegenüber Neuware rund €50/t.

Das IPA kommt zum Schluss, dass ein Schließen von Produktkreisläufen auch im Bereich von Kunststoffen machbar ist. Für die Realisierung ist nicht nur Engagement aller Teilnehmer notwendig, sondern Anreiz und Unterstützung durch Öffentlichkeit und Behörden, vor allem im Hinblick auf die Verbesserung der Kostensituation.

Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG

Hydrierung

Die Anwendbarkeit der Hydrierung für die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen aus EAG wurde in der Kohleölanlage Bottrop untersucht. Die Versuche bestätigten die Eignung der Anlage bzw. der Kunststoffabfälle für diesen Verwertungsweg. Die Hydrierung stellt derzeit keine praktische Verwertungsoption dar, da die Kohleölanlage mit Ende 1999 stillgelegt und demontiert wurde.

Synthesegas/Methanolherstellung

Im Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ) werden kohlenwasserstoffhaltige Abfallstoffe zu Synthesegas vergast. Das Spektrum der Abfälle, die im SVZ verwertet werden können, ist groß und umfasst neben industriellen Abfällen aufbereiteten Hausmüll, Klärschlämme, kontaminiertes Altholz und Mischkunststoffe. Das Verfahren ist ausgesprochen flexibel was die Zusammensetzung des Vergaserinputs betrifft, zur Gewährleistung eines stabilen Vergaserbetriebes werden die Abfälle in Form definierter Mischungen eingesetzt. Verfahrensbedingt wird den Einsatzstoffen Braunkohle zugesetzt, wobei der Anteil variabel ist und im Jahresdurchschnitt bei 20% liegt. Neben Mischkunststoffen aus der Verpackungssammlung werden im SVZ auch Kunststoffe aus der Aufbereitung von EAG im Umfang von ca. 50 t/Woche verwertet.

Die im Vergleich zu Verpackungsabfällen erhöhten Halogen- und Schwermetallkonzentrationen in den EAG-Kunststoffen sind im Rahmen dieses Verwertungsverfahrens wenig problematisch. Nichtflüchtige Schwermetalle werden bereits im Festbettdruckvergaser in die Schlacke eingebunden. Die flüchtigen Schwermetalle (Hg, Cd, Zn) gelangen nach dem Festbettvergaser in den Rohgasstrom, wo sich infolge der reduzierenden Atmosphäre und in Anwesenheit von Schwefelwasserstoff schwerlösliche Sulfide und Hydroxide bilden. Diese gelangen in der Gaskondensation in die Teer/Öl-Phase und mit dieser in die Flugstromvergasung. Die Flugstromvergasung arbeitet oberhalb des Ascheschmelzpunktes und liefert eine flüssige, glasartige Schlacke in der die Schwermetalle eingebunden sind. Im Synthesegas verbleibende Reste werden in Aktivkohlefiltern entfernt.

Die hohen Betriebstemperaturen in den Vergasern sorgen für eine weitgehende Zerstörung von organischen Schadstoffen und die schockartige Abkühlung der Rohgase vermeidet eine Denovo-Synthese. Im Rohgas des Festbettvergasers dennoch vorhandene Dioxine und Furane werden im Quencher abgeschieden und in der Flugstromvergasung sicher zerstört. Die Dioxinkonzentrationen im Reingas liegen im allgemeinen unter 2 pg TE/m³.

Indirekte Verfahren zur rohstofflich/thermischen Verwertung

Metallurgisches Verfahren

Der direkte Einsatz von Elektronikschrott, v.a. Leiterplatten, als Rohmaterial zur Gewinnung von sekundären Nicht-Eisenmetallen im Rahmen von metallurgischen Verfahren ist eine Verfahrensvariante, die in der Praxis angewandt wird. Die Frage, ob und unter welchen Bedingungen auch zerkleinerte EAG als Rohstoffquelle für diese metallurgischen Recyclingprozesse geeignet sind wurde im Rahmen eines mehrjährigen Versuchs-

projektes in einer schwedischen Hütte untersucht. Da es sich bei den in Frage kommenden Verfahren chemisch gesehen um Reduktionsvorgänge handelt kann der in den EAG enthaltene Kunststoff nicht nur die Rolle eines Brennstoffes, sondern auch die Funktion eines Reduktionsmittels übernehmen.

Die Hütte in Rönnskär produziert als Hauptprodukte Kupfer und Blei, zusätzlich Zinkoxidklinker und Edelmetalle aus der Schrottaufbereitung und der Einsatz von Leiterplatten- und Kabelschrott hat Tradition. Aus kupferreichen Materialien wird im Schwebelötrofen Schwarzkupfer extrahiert und anschließend zu Reinkupfer raffiniert. Sekundärrohstoffe wie metallhaltige Schlacken, Stäube, Schlämme werden in einem Verblaseofen behandelt: In das geschmolzene Material werden Kohlestaub und vorgewärmte Luft eingeblasen.

Das entstehende Kohlenmonoxid reduziert die in der Schmelze vorhandenen Metalloxide. Kupfer und Edelmetalle verbleiben in der Schmelze, Zink und Blei verdampfen und werden im Gasraum reoxidiert. Die im Elektrofilter aus dem Gasstrom abgeschiedenen Metalloxide werden anschließend in einem Drehrohr bei 1.200°C unter Zugabe von Koks (Abtrennung von Halogeniden und Blei) behandelt.

Der aus dem Drehrohrabgas abgeschiedene bleihaltige Staub gelangt zur Verhüttung. Als Produkt verbleibt Zinkoxidklinker mit einem Gehalt von ca. 70%-75% Zinkoxid, der an eine Zinkhütte abgegeben wird.

Versuche mit dem Zusatz von zerkleinerten PCs (schadstoffentfrachtet und von Eisenmetallen befreit) zum normalen Einsatzgut für den Verblaseofen brachten folgende Ergebnisse:

- Die mit den Computerabfällen in den Ofen eingebrachten Kunststoffe wirken überwiegend als Reduktionsmittel, in Form von CO und Wasserstoff.
- In den aus dem Flugstaub abgeschiedenen Oxiden treten deutlich erhöhte Bromidkonzentrationen auf, die im Drehrohr ins Abgas gelangen und in der Gasreinigung abgeschieden werden.
- Die Qualität des Zinklinkers blieb unverändert. Die Dioxinkonzentrationen im Endprodukt Zink lagen unter der Nachweisgrenze.
- Eine Analyse der Stoffströme für Halogene, Quecksilber und Antimon ergab, dass die freigesetzten Halogenide in den Gasreinigungsanlagen des Verblaseofens bzw. des Drehrohres abgeschieden werden. Das mit den Computerabfällen in den Ofen eingebrachte Antimon befindet sich zu 65% im Flugstaub, der Rest verbleibt in der Schlacke. Die Abscheidrate für Quecksilber liegt bei 22%.
- Die Emissionen von Stickoxiden, Schwefeloxiden und Kohlenmonoxid bleiben unbeeinflusst.
- Massebilanzen für Dioxine und Furane belegen die Zerstörung der mit dem Einsatzmaterial in den Prozess eingebrachten Dioxine und Furane im Verblaseprozess im Ausmaß von 98% Die im Flugstaub verbleibenden Dioxine und Furane werden im Drehrohr bei 1.200 °C zerstört.

Für EAG mit einem hohen Anteil an wertvollen Metallen können metallurgische Recyclingprozesse in Betracht gezogen werden. Die enthaltenen Kunststoffe werden im Rahmen derartiger Verfahren einer rohstofflich/thermischen Verwertung zugeführt.

Die praktische Anwendung erfordert die Festlegung anlagen- und prozessspezifischer Anforderungen für das Inputmaterial und zusätzliche Einrichtungen zur Emissionsminderung wie z.B. Aktivkohlefilter. Die Wirtschaftlichkeit der Verwertungsoption hängt von unternehmens- und anlagenbezogener Faktoren sowie regionalen Rahmenbedingungen ab und kann nur im konkreten Einzelfall beurteilt werden.

Thermische Verwertung

Pyrolyse

Aufgrund ihres hohen Metallgehaltes in Verbindung mit dem hohen Heizwert von Kunststoffen kommt für EAG prinzipiell auch eine Pyrolyse als Vorbehandlung für eine nachfolgende Verwertung in Betracht. Bereits 1993-1995 wurde in Berlin die Einsatzfähigkeit des sogenannten PYROCOM-Verfahrens für die Behandlung von Leiterplattenschrott, Kunststoffe aus EAG sowie Shredderleichtfraktionen untersucht. 1998 wurden im Auftrag der BASF AG in der PYROCOM-Pilotanlage abermals Versuche zur Behandlung von Abfallfraktionen aus EAG gefahren. Beide Projekte wurden von BC-Consult Berlin abgewickelt.

Das PYROCOM-Verfahren stellt ein Verfahren der gestuften Verbrennung mit den beiden Modulen Pyrolyse und Verbrennung dar. Im Pyrolyseschritt erfolgt die thermische Zersetzung der organischen Materialien unter reduzierenden Bedingungen. Die im Einsatzgut vorliegenden Metalle verbleiben im Pyrolyserückständen und können daraus zurückgewonnen werden. Für die gasförmigen Pyrolyseprodukte sieht das Verfahren eine Nutzung als Heizgas vor.

Im Rahmen der Projekte wurden in einer halttechnischen Anlage unter Einsatz unterschiedlicher Abfallgemische der Pyrolyseprozess, die entstehenden Produkte und ihre Verwertbarkeit untersucht. Die Pyrolyse findet in einem beheizten Drehrohr bei 650-850°C statt. Die Verweildauer im Drehrohr lässt sich durch die Neigung und die Drehzahl des Drehrohres den Erfordernissen des Einsatzgutes anpassen. Die festen Pyrolyserückstände (Pyrolysekoks) werden entweder über ein trockenes oder nasses System ausgetragen und für die weitere Verwendung gelagert. Das Pyrolysegas dient nach einer mehrstufigen Gasreinigung inklusive Aktivkohlefilter als Heizgas.

Zusammenfassend kamen die Untersuchungen zu folgendem Ergebnis:

Die Pyrolyse spaltet das Einsatzgut in einen festen Rückstand mit einem geringen organischen Anteil und ein Pyrolysegas, wobei der Gasanteil bei 55-75% liegt. Aus dem Pyrolysegas lassen sich in einer Gasbehandlung 20-40% kondensierbare Anteile als Pyrolyseöl abscheiden. Die im Einsatzgut vorliegenden Metalle werden schonend, ohne Oxidation aufgeschlossen. Organische Schadstoffe wie PCB und halogenierte Dioxine/Furane werden aufgrund der reduzierenden Atmosphäre im Drehrohr weitgehend zerstört.

Die Verwertung der Pyrolyseprodukte ist schwierig und erfordert eine aufwendige Vorbehandlung: Das Pyrolysegas ist nach einer 5 stufigen Gasreinigung (Quencher, 3 Wäscher, Aktivkohlefilter) als Heizgas geeignet. Für den festen Rückstand bietet sich die Auftrennung in Metallkonzentrate, eine kohlenstoffhaltige Brennstofffraktion und eine deponiefähige Inertstofffraktion an. Die Metallkonzentrate sind für den Einsatz in einer Sekundärkupferhütte geeignet, die Brennstofffraktion ist aufgrund hoher Schwermetallgehalte (Cu, Zn, Blei, Antimon) nur in Abfallverbrennungsanlagen nutzbar. Die Inertstofffraktion ist für eine Deponierung grundsätzlich geeignet.

Als Alternative ist der Direkteinsatz des Pyrolyserückstandes in einer Sekundärkupferhütte denkbar, wobei die grundsätzliche Realisierbarkeit von Hüttenbetreibern bestätigt wird. Die Verwertung der Pyrolyseöle ist das größte Problem. Ein Einsatz in der Petrochemie oder Kokerei scheitert an der Elementarzusammensetzung und am Halogengehalt. Der Heizwert von 30-40 MJ/kg macht sie zwar als Stützbrennstoff interessant, aufgrund des hohen Halogengehaltes aber nur für Anlagen mit entsprechend dimensionierten Rauchgasreinigungsanlagen. Das Problem der Halogenabscheidung konnte nicht gelöst werden.

Eine Kostenkalkulation für den Betrieb einer technischen Anlage ergibt für Anlagen mit einer Jahreskapazität unter 10.000 t/a Betriebskosten in der Höhe von €200-250/t und Behandlungskosten von ca. €400-450/t, je nach Aufbereitung und Verwertung der Pyrolyseprodukte. Die Projektdurchführung (BC-Consult Berlin) kam zum Schluss, dass die Aufarbeitungsvariante Pyrolyse für EAG erst ab einer Anlagenkapazität von mind. 10.000 t/a (stündlicher Durchsatz 2 t!) und nur im räumlichen Verbund mit einer Sekundärkupferhütte überhaupt wirtschaftlich zu betreiben ist. Die Investitionskosten für die Hütten sind sehr hoch und die Amortisationszeit ist mit geschätzten 10 Jahren sehr lang. Die Aufarbeitungsvariante Pyrolyse ist daher nur sehr bedingt ökonomisch attraktiv und die Realisierungschancen sind als gering einzustufen.

Verbrennung

Der Heizwert der im E & E-Bereich verwendeten Kunststoffe liegt durch den geringeren Polyolefinanteil und verwendete mineralische Füllstoffe im Durchschnitt niedriger als im Verpackungsbereich. Relevant im Hinblick auf eine Verbrennung sind die in Kunststoffen EAG enthaltenen Flammschutzmittel sowie ihr im Vergleich zu Verpackungskunststoffen höherer Schwermetallgehalt - besonders für industrielle Verbrennungsanlagen.

Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen

Es ist davon auszugehen, dass in gemäß dem Stand der Technik betriebenen Abfallverbrennungsanlagen Kunststoffe aus EAG ohne negative Auswirkungen auf die Umwelt eingesetzt werden können.

Ergebnisse eines Versuchsprojektes über die Mitverbrennung von Kunststoffen aus EAG in Abfallverbrennungsanlagen bestätigen diese Annahme und zeigten auch die Auswirkungen des zusätzlichen Eintrages von Flammschutzmitteln und Schwermetallen.

Die Zerstörungsrate für bromierte Flammschutzmittel lag > 99,00%. Chlor und Brom erhöhten erwartungsgemäß die Halogenwasserstoffkonzentration im Rohgas und in der Folge die Salzfracht nach den Wäschern. Die Summe aller halogenierten Dibenzodioxine und -furane im Rohgas zeigte sich trotz steigendem Br-Einsatz annähernd konstant und lag im Normalbereich der Testanlage.

Beeinflusst vom Br-Eintrag wurde die Verteilung zwischen chlorierten, bromierten und gemischthalogenierten Dioxinen und Furanen. Die Dioxinemissionen im Reingas nach einem Aktivkohleabsorber lagen unter $0,001 \text{ ng TE/m}^3$.

Das Verhalten der Schwermetalle bei der Verbrennung ändert sich durch die Kunststoffzugabe nicht entscheidend, die Verteilung auf die Reststoffe bleibt unbeeinflusst, die Absolutkonzentrationen in den einzelnen Reststofffraktionen steigen in Abhängigkeit vom Input im erwarteten Ausmaß.

Einsatz in industriellen Feuerungsanlagen

Für den Bereich der Mitverbrennung in industriellen Feuerungsanlagen existieren Brennstoffanforderungen, die von der technischen Konzeption der jeweiligen Anlage und den vorhandenen Rauchgasreinigungs- und Reststoffaufbereitungsanlagen bestimmt werden. Inwieweit diese Anforderungen von Kunststoffen aus EAG erfüllt werden können, ist im Einzelfall zu prüfen. Ähnlich wie im Fall der stofflichen Verwertung ist für eine Verwertung von Kunststoffen aus EAG die Definition verschiedener Kategorien von Ersatzbrennstoffen vorstellbar, deren Qualitätsanforderungen in Analogie zur stofflichen Verwertung vom Verwerter vorzugeben sind. So sind die geltenden Anforderungen für den Einsatz von Verpackungskunststoffen als Zusatzbrennstoff in Zementöfen von „gemischten“ Kunststoffen aus EAG wahrscheinlich nicht einhaltbar. Es ist vorstellbar aus bestimmten Gerätegruppen Kunststoffe zu extrahieren, die den Auswahlkriterien entsprechen.

Ein ähnliches Vorgehen kann auch für andere industrielle Feuerungsanlagen die Frage klären, inwieweit aus EAG passende Ersatz- bzw. Zusatzbrennstoffe gewonnen werden können und zu ökonomisch vertretbaren Bedingungen zur Verfügung stehen.

V. KUNSTSTOFFVERWERTUNG AUS EAG IN ÖSTERREICH

Rechtliche Rahmenbedingungen

Österreich

Deponieverordnung

Die seit 1.1.1997 für Neuanlagen in Kraft befindliche Deponieverordnung (Verordnung über die Ablagerung von Abfällen) untersagt im § 5 die Ablagerung von Abfällen, deren Gehalt an organischen Kohlenstoff 5% übersteigt bzw. deren Heizwert 6000 KJ/kg übersteigt. Mit Ablauf der in der Novelle zum Wasserrechtsgesetz 1997 festgelegten Übergangsfrist für die Anpassung bestehender Deponien an die Anforderungen der Deponieverordnung am 1.1.2004, sind sämtliche Abfälle - so sie nicht einer stofflichen Verwertung zugeführt werden bzw. werden können - einer thermischen oder mechanisch-biologischen Behandlung zuzuführen. Spätestens ab diesem Zeitpunkt steht die derzeit noch verbreitet genutzte Entsorgungsvariante Deponierung für Kunststoffe generell nicht mehr zur Verfügung.

Richtlinie zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten

Auf der Basis der ÖNORM S 2106 und unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Pilotprojekten zur Sammlung und Behandlung von EAG wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie eine „Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ herausgegeben. Die Richtlinie orientiert sich an der ÖNORM S 2106 und enthält für die Behandlung von Kunststoffen die Empfehlung zur stofflichen Verwertung oder thermischen Behandlung bzw. Verwertung. Im Detail wird darauf verwiesen, dass eine stoffliche Verwertung von mit halogenhaltigen Flammschutzmittel und/oder schwermetallhaltigen Zusätzen versehenen Kunststoffen nicht erwünscht ist und eine thermische Verwertung bzw. Behandlung in entsprechend ausgerüsteten Anlagen zu erfolgen hat.

Bundesabfallwirtschaftsplan

Inhaltlich findet sich die „Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ auch im Teil II des Bundesabfallwirtschaftsplans 1998 unter dem Punkt Behandlungsgrundsätze für bestimmte Abfall- und Stoffströme - Empfohlene Entsorgungswege für Elektroaltgeräte.

Europäische Union

Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von EAG

Im Juni 2000 wurden von der Europäischen Kommission der Entwurf zu einer *Richtlinie betreffend Elektro- und Elektronikaltgeräte* und der Entwurf zu einer *Richtlinie zur Begrenzung gefährlicher Inhaltsstoffe in Elektro- und Elektronikgeräten* angenommen und dem Europäischen Parlament und dem Europäischen Rat zur Behandlung zugeleitet.

Die Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte sieht verpflichtend Maßnahmen zur getrennten Sammlung sowie Vorgaben für die Behandlung von EAG vor. Gemäß dem Richtlinienentwurf sind gesammelte EAG insgesamt 10 verschiedenen Gerätegruppen zuzuordnen, wobei für jede der Gerätegruppen spezifische Verwertungsquoten zu erreichen sind. Zusätzlich zu einer Gesamtverwertungsquote, die je nach Gerätegruppe zwischen 60 und 80 % des Gerätegewichtes liegt, sind Mindestquoten für die Wiederverwendung und das Recycling von Bauteilen, Materialien und Substanzen festgelegt. Der Begriff Recycling schließt die thermische Verwertung dezidiert aus. Diese Quoten liegen je nach Gerätegruppe zwischen 5 und 10 % unter der Gesamtverwertungsquote, konkret zwischen 50 und 75% des Gerätegewichtes.

Geht man vom aktuell in EAG anzutreffenden Material-Mix aus, so wären die Recyclingquoten mit einigen Ausnahmen wie z.B. den Kühlgeräten und Haushaltskleingeräten, derzeit noch ohne die stoffliche Verwertung der Kunststoffanteile erreichbar. Die Zunahme des Kunststoffeinsatzes in Elektrogeräten, auch in Bereichen, für die bisher geringe Kunststoffanteile charakteristisch sind, wie große Haushaltsgeräte, führt dazu, dass der Aufbau entsprechender Strukturen für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG notwendig ist.

Verfügbare Mengen an Kunststoffen aus EAG

Das aktuelle Potenzial an Elektroaltgeräten in Österreich wird mit 100 - 120.000 t/Jahr beziffert, wobei man davon ausgeht, dass etwa 55 - 60% des Abfallpotenzials im Bereich der privaten Haushalte liegt. Das Kunststoffpotenzial in EAG wird im Mittel mit 20% angenommen.

Im Hinblick auf eine stoffliche Verwertung von Kunststoffen ist die Abschätzung möglicher sortenreiner Kunststoffströme in Abhängigkeit von Gerätegruppen von Bedeutung. Neben Sortenreinheit und geringer Schadstoffbelastung spielt Zukunftsfähigkeit einer stofflichen Verwertung eine Rolle. Der Versuch einer derartigen „Kunststoffstromabschätzung“ ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Kunststoffpotenzial in EAG in Österreich (1999)

Geräteart	Altgeräte (t)	Kunststoffanteil (%)	Potentielle Kunststoffmenge (t)
Kühlschränke*	8.400	35-50	3.528
Gefriergeräte*	4.095	35-50	1.720
Zwischensumme 1	<i>12.495</i>		<i>5.248</i>
Waschmaschinen	10.200	10-15	1.225
Herde	6.075	10-15	760
Wäschetrockner	750	10-15	94
Geschirrspüler	2.790	10-15	349
Zwischensumme 2	<i>19.815</i>		<i>2.428</i>
TV-Geräte	9845	20	1.969
Monitore	2.925	20-25	658
Zwischensumme 3	<i>12.770</i>		<i>2.627</i>
Videorecorder	1.417	30	425
Audioanlagen	800	30-40	289
Radiorecorder	480	30-40	168
Portables	373	30-40	130
Autoradios	456	?	0
Videokameras	80	15-20	14
Zwischensumme 4	<i>3.606</i>		<i>1.026</i>
Staubsauger	2.700	40-50	1.215
Kaffeemaschinen	780	20	156
Wasserkocher	140	20	28
Mikrowellenherde	1.725	7	121
Toaster	168	20	34
Div. Küchengeräte	573	15-20	100
Bügeleisen	592	40-50	266
Fön, Hairstyling u.ä.	337	40-50	152
Frittiergeräte	231	40-50	104
Rasierer	86	20	17
Mundhygiene	84	50	42
Zwischensumme 5	<i>7.416</i>		<i>2.235</i>
PCs	1.762	10-12	194
Drucker	865	20	173
Zwischensumme 6	<i>2.627</i>		<i>367</i>
Gesamt (ZWS 2-6)	46.234		8.683
Gesamtsumme	58.729		13.931

Die Basis für die Abschätzung bilden:

- Abschätzungen über das EAG-Potenzial gegliedert nach Geräten
- Informationen aus der Kunststoffindustrie und von Geräteherstellern hinsichtlich der Art, der Mengen und den bevorzugten Einsatzgebieten für bestimmte Kunststoffe
- Die in verschiedenen praktischen Demontageversuchen gewonnenen Erfahrungen über Gerätegewichte und Kunststoffanteile in verschiedenen Geräten.

Die Abschätzung des EAG-Potenzials erfolgte zunächst auf Basis des Ausstattungsgrades der österreichischen Haushalte und einer mittleren Nutzungsdauer. Für jene Bereiche, für die keine Daten zum Ausstattungsgrad vorliegen, wie Kleingeräte wurde das Altgerätepotenzial über den Absatz neuer Geräte und einer gerätespezifischen „Altgeräteeersatzquote“ berechnet. Diese Abschätzung wurde zusätzlich für jene Geräte durchgeführt, für die nur veraltete Angaben zum Ausstattungsgrad österreichischer Haushalte verfügbar sind. Die Gegenüberstellung der konsumseitigen Abschätzung mit der abfallseitigen Abschätzung (33-37) zeigt mit Rücksicht auf die Tatsache, dass ein Teil der im Rahmen von EAG Sammlungen anfallenden Geräte konsumseitig nicht erfasst werden konnten (elektrische Werkzeuge, Gartengeräte, Nähmaschinen, Spielzeug, Fotoapparate), recht gute Übereinstimmung.

Tabelle 5: EAG in Österreich konsumseitige Abschätzung/abfallseitige Abschätzung

Gerätegruppe	Abfallseitig *		Konsumseitig	
	Anteil (%)	Menge (t)	Anteil (%)	Menge (t)
Bildschirm	22	13.778	22	12.778
EKG	20	12.526	24	13.649
Großgeräte*	38	23.800	35	19.815
Sonstiges	20	12.526	18	n. erfasst
Summe	100	62.629	100	46.234

*ohne Kühlgeräte

Der abgeschätzte Kunststoffanteil in den EAG liegt in Summe bei 19% und damit im erwarteten Bereich. Berücksichtigt man in der Abschätzung auch die Kühlgeräte so steigt der Kunststoffanteil auf 25%. Die im gewerblichen Bereich eingesetzten Geräte unterscheiden sich in der Gerätestruktur und im Kunststoffgehalt vom Konsumbereich, so dass in Summe ein durchschnittlicher Kunststoffgehalt von ca. 20% für die gegenwärtig insgesamt anfallenden EAG realistisch ist.

Mit Rücksicht auf die Sortenstruktur der eingesetzten Kunststoffe zeigen sich für die stofflichen Verwertung grundsätzlich folgende auch aus der gegenwärtigen Praxis bekannte Ansatzpunkte:

- Verwertung von Polypropylen aus großen und kleinen Haushaltsgeräten
- Verwertung von ABS aus Haushaltsgeräten und ausgewählten Geräten der Bürotechnik
- Verwertung von Polystyrol aus Kühl- und Gefriergeräten

Die großen Mengen an Polystyrol und auch ABS, die im Bereich der Unterhaltungselektronik und Teilen der Informations- und Bürotechnik zu finden sind (TV- und Monitorgehäuse), entziehen sich zumindest derzeit weitgehend einer stofflichen Verwertung infolge der Flammenschutzmittel- und Schwermetallfrage.

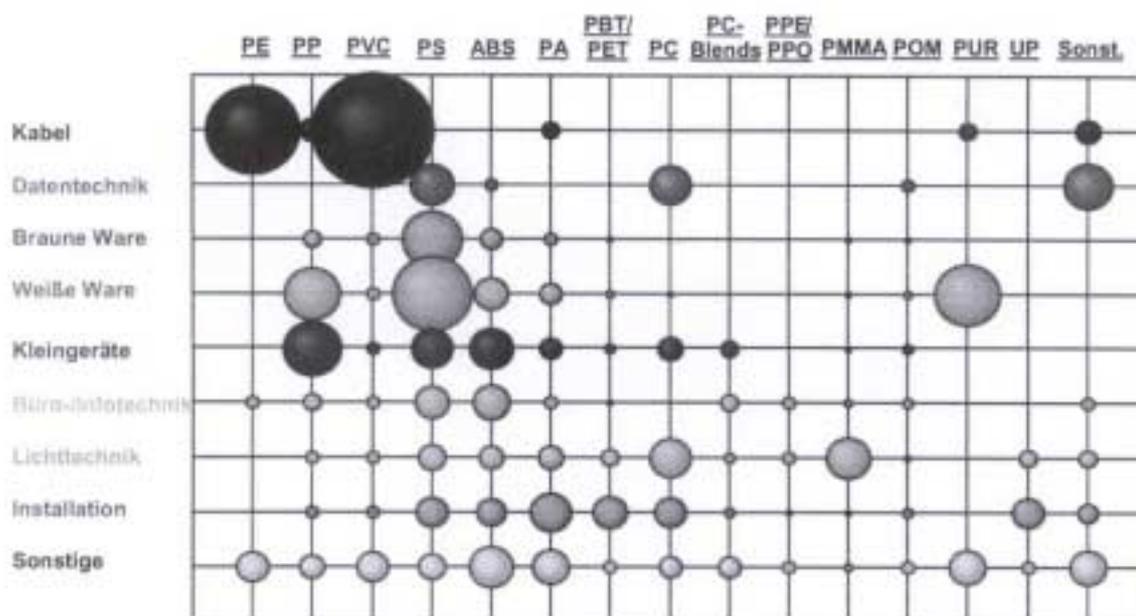


Abb. 2: Kunststoffverteilung im Einsatzbereich Elektro- und Elektronikgeräte (VKE 1998)

Stoffliche Verwertung

Was die Frage der tatsächlich für eine Verwertung zur Verfügung stehenden Mengen betrifft, so stellen die in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellten Kunststoffmengen das Potenzial und damit eine Art erwartetes Maximum dar. 1999 lag die Menge der in Österreich getrennt gesammelten EAG bei ca. 6.500 t, die sich ungefähr zur Hälfte auf Elektrokleingeräte und Bildschirmgeräte aufteilten. Große Haushaltsgeräte werden häufig gemeinsam mit Altmetallen erfasst, Kühl- und Gefriergeräte werden im Zusammenhang mit der entsprechenden Verordnung getrennt erfasst und verwertet.

Geht man für die Abschätzung der in den gesammelten EAG verfügbaren Kunststoffmengen von einem Kunststoffanteil von ca. 28% für Kleingeräte und 20% für Bildschirmgeräte aus, so ergibt sich eine theoretisch verfügbare Gesamtkunststoffmenge von 900 t aus dem Bereich EKG und 600 t aus dem Bereich Bildschirmgeräte.

Legt man einer mittelfristigen Entwicklungsperspektive für die stoffliche Verwertung die im aktuellen EU-Richtlinien-Vorschlag vorgesehene jährliche Mindesterfassungsquote von 4 kg/EW aus dem privaten Bereich zugrunde, so werden in Österreich im Jahr 2005 zumindest 32.000 t EAG mit einem Kunststoffanteil von ca. 9.000 t getrennt zu erfassen und zu verwerten sein. Unter der Annahme einer Zunahme von Bildschirmgeräten und IT-Geräten in EAG und einem gleichzeitig generell steigenden Kunststoffanteil, könnte sich folgendes Bild ergeben:

Tabelle 6: Abschätzung der zu verwertenden Kunststoffe aus EAG im Jahr 2005

Gerätegruppe	Anteil %	Spez. Sammelmenge kg/EW.a	Gesamt-sammelmenge t/a	Kunststoff-anteil %	Kunststoff-menge t/a
Bildschirm	25	1,0	8.092	25	2.023
EKG	25	1,0	8.092	50	4.046
Großgeräte	30	1,2	9.710	20	1.942
Sonstige	20	0,8	6.474	20	1.295
Summe	100	4,0	32.368	Ø 26	9.306

Selbst wenn keine praktikablen Methoden verfügbar sind, um schadstoffhaltige Kunststoffteile gezielt auszuscheiden und somit alle Gehäuse von Bildschirmgeräten nicht für eine stoffliche Verwertung in Betracht

kommen, beläuft sich die grundsätzlich für eine Verwertung vorhandene Kunststoffmenge dann auf insgesamt rund 7.000 t/a.

Etwa 50% der Kunststoffe aus dem Bereich der „weißen“ Elektrokleingeräte (EKG), Haushalts- und Küchengeräten, werden in Zukunft auf PP entfallen, der Rest wird sich zu etwa 20 % auf ABS, 20% PS und 10% andere Kunststoffe verteilen. Aus Geräten der Unterhaltungselektronik ist vornehmlich PS zu erwarten.

PP wird auch aus Großgeräten anfallen, wobei es sich infolge der bei Großgeräten langen Nutzungsdauer um stark beanspruchte Kunststoffe handelt, was einen Einfluss auf die Verwertungsmöglichkeiten haben wird.

Unter der Annahme, dass sich die Geräteverteilung in den gesammelten Kleingeräten nicht dramatisch ändert und ca. 50% der EKG auf „weiße Ware“ entfallen, werden aus gesammelten Staubsaugern (ca. 30% der weißen EKG) ca. 500 t ABS zur Verfügung stehen, aus Küchengeräten ca. 700 t PP und ca. 500 t PS aus Geräten der „braunen“ Ware.

Möglicherweise stehen auch einige hundert Tonnen ABS und PS aus dem Bereich Bürotechnik zur Verfügung, obwohl die zu erwartenden Altgerätemengen schwierig abzuschätzen sind und die Kunststoffe nur zum Teil für eine stoffliche Verwertung in Frage kommen.

In Österreich sind derzeit 9 Kunststoffverwertungsbetriebe tätig, die gemeinsam über eine Regranulierkapazität von ca. 86.000 t/a verfügen. Die verfügbare Mahlkapazität im Bereich Kunststoffrecycling liegt bei ca. 185.000 t/a und verteilt sich auf 16 Betriebe. Alle Regranulierbetriebe verfügen auch über Mahlkapazitäten, die in der Regel höher sind als die jeweilige Granulierkapazität. Die Verfahrenskapazitäten Mahlen und Granulieren dürfen allerdings nicht additiv gesehen werden, da der Mahlvorgang vielfach eine Vorstufe zur Regranulierung darstellt.

Neben den klassischen Kunststoffverwertern stehen in Österreich auch Anlagen für die mechanische Aufbereitung von EAG zur Verfügung, wovon zumindest eine auch derzeit in der Lage ist, sortenreines Kunststoffmahlgut herzustellen. Die Verwertung der in den EAG enthaltenen Kunststoffmengen über die klassische „Route“ – in Form sortierter Fraktionen - stellt für die heimischen Kunststoffverwerter grundsätzlich kein Kapazitätsproblem dar. Die große Schwierigkeit liegt vielmehr in der Bereitstellung sortierter Fraktionen und der Bündelung der geringen Materialströme. Dies erfordert die Errichtung von Demontage- und Sortierzentren und ein entsprechendes Logistikkonzept. Für die Verwertung über den Weg der mechanischen Aufarbeitung ist eine Ausweitung der in Österreich dafür verfügbaren Anlagenkapazitäten notwendig. Der Sortier- und Demontageaufwand ist geringer und konzentriert sich auf die Bildung von definierten „Verwertungsklassen“. Unabhängig vom gewählten Verfahren ist in jedem Fall der Aufbau der notwendigen „Recyclingpartnerschaften“ unbedingt erforderlich.

Tatsache ist, dass die bei der Behandlung und Aufarbeitung der heute bereits getrennt gesammelten EAG anfallenden Kunststoffe nicht stofflich verwertet werden. Sie werden überwiegend durch Deponierung entsorgt, dort wo entsprechende Anlagen verfügbar sind, thermisch genutzt. Ausnahmen bilden Chargen gleichartiger Geräte oder -teile, die aus der Produktion oder dem Handel direkt an Entsorger und Verwerter abgegeben werden und deren Zusammensetzung genau bekannt ist. Generell behindern die geringen Mengen an verfügbaren „unbedenklichen“ Kunststoffen, die günstigen Deponierungsmöglichkeiten und die Kostensituation die stoffliche Verwertung.

Thermische Verwertung

Die gesamte Behandlungskapazität der in Österreich verfügbaren Abfall- und Reststoffverbrennungsanlagen liegt bei 800.000t/a und ist an den Standorten Wien, Wels und Lenzing konzentriert. In diesen Anlagen gelangen bereits heute Kunststoffabfälle aus den getrennt oder über den Systemmüll erfassten EAG in die thermische Nutzung.

In Wien sind das ca. 1.800 t/a, für Wels lässt sich die aus EAG stammende Kunststoffmenge sehr grob mit 200 t/a abschätzen.

Das ausnahmslose Inkrafttreten der Deponieverordnung mit 1.1.2004 bedeutet für Kunststoffe, dass sie einer thermischen Behandlung/Verwertung zuzuführen sind, sofern sie nicht einer stofflichen oder chemischen Verwertung zugeführt werden.

Aus EAG ist in den kommenden Jahren insgesamt eine Kunststoffabfallmenge von 20-30.000 t/a zu erwarten, die mittelfristig auf etwa 50-60.000t/a ansteigen wird. Ungeachtet der Tatsache, dass ein Teil davon im Zuge der Erfüllung der EU-Richtlinie stofflich verwertet werden muss, hängt die Realisierung der thermischen Verwertung der verbleibenden Kunststoffmengen im wesentlichen von der Verfügbarkeit geeigneter Verbrennungsanlagen ab. Für Kunststoffe aus EAG werden das in der Regel Abfallverbrennungsanlagen sein und es ist davon auszugehen, dass diese im Zusammenhang mit der Umsetzung der Deponieverordnung zur Verfügung stehen werden. Für bestimmte Kunststofffraktionen aus EAG bietet sich wahrscheinlich auch die Nutzung als Ersatzbrennstoff für Industrieanlagen.

VII. ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE ASPEKTE VERSCHIEDENER VERWERTUNGSWEGE FÜR KUNSTSTOFFE AUS EAG

Ökologische Aspekte

Für die Untersuchung von ökologischen Auswirkungen, die von Prozessen oder Produkten hervorgerufen werden, hat sich die Ökobilanzierung (Life Cycle Analysis, Life Cycle Assessment) etabliert. Ausgehend vom gewünschten Ziel des betrachteten Prozesses bzw. Nutzen eines Produktes werden die damit verbundenen Belastungen für die Umwelt erfasst. Als messbare Belastungsparameter werden die Menge und Art der benötigten Rohstoffe, der Energiebedarf und der Verbrauch verschiedener Energieträger, die Emission von Schadstoffen in die Luft und ins Wasser sowie die Menge und Art zu entsorgender Abfälle herangezogen. Für die Abschätzung der ausgelösten Umweltauswirkungen hat sich die Durchführung einer Wirkungsanalyse etabliert, wobei die Primärbelastungen verschiedenen sogenannten Wirkungskategorien zugeordnet werden (z.B. Treibhauseffekt, Versauerung). Die unterschiedliche Wirksamkeit verschiedener Primärbelastungen in einer Wirkungskategorie wird berücksichtigt, indem für jede Kategorie eine Leitsubstanz festgelegt wird (z.B. CO₂ für den Treibhauseffekt). Andere der Kategorie zugeordnete Belastungen (z.B. Methan beim Treibhauseffekt) werden in ihrer Wirksamkeit auf die Leitsubstanz bezogen und die auf diese Weise erhaltenen Äquivalenzfaktoren ermöglichen eine Zusammenfassung der Beiträge verschiedener Primärbelastungen innerhalb einer Kategorie.

Für die Verwertung der vom DSD getrennt gesammelten Kunststoffverpackungen wurden insgesamt 12 verschiedene Verwertungsmöglichkeiten (stoffliche Verwertung mit 4 Produktvarianten, 5 rohstoffliche und 3 thermische Verfahren) im Rahmen einer Ökobilanz auf Basis einer Sachbilanz und einer Wirkungsanalyse untersucht. Die vom Fraunhofer Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung in Freising durchgeführte Untersuchung kommt zu folgendem Ergebnis (13,23):

- Der ökologische Nutzen verschiedener Verwertungsverfahren wird wesentlich davon bestimmt, in welchem Umfang die Verwertungsprodukte die Herstellung von herkömmlichen Produkten aus Primärressourcen „überflüssig“ machen und mit welchen Umweltbelastungen dies verbunden ist.
- Die Unterscheidung in stoffliche, rohstoffliche und thermische Verfahren erlaubt a priori keine Aussage über den ökologischen Nutzen des Verwertungsverfahrens.
- Die im Rahmen der Untersuchung betrachteten thermischen Verfahren sind bei effizienter Energienutzung gegen die untersuchten rohstofflichen Verfahren konkurrenzfähig.
- Werkstoffliche Verfahren zeigen unter der Voraussetzung, dass die Regranulate Neuware im Verhältnis 1:1 ersetzen und die Aufbereitung mit geringen Materialverlusten verbunden ist, deutliche ökologische Vorteile.
- Die im Zusammenhang mit der stofflichen Verwertung ökonomisch so relevanten Prozesse wie Transport, Sammlung und Sortierung sind unter ökologischen Gesichtspunkten nicht relevant.

Die Studienergebnisse gelten strenggenommen nur für die untersuchte Situation (Verwertung von Verpackungsabfällen aus dem DSD System mit den in Deutschland zur Verfügung stehenden Verfahren) lassen aber zumindest Abschätzungen über die ökologische Sinnhaftigkeit bzw. den ökologischen Nutzen verschiedener Verwertungsverfahren in anderen Abfallbereichen zu. Die Anwendung der genannten Kriterien für die Verwertung von Kunststoffen aus EAG ergibt folgendes Bild:

- Die gegenwärtige Verwertungspraxis belegt, dass die gewonnenen Mahlgüter und Regranulate überwiegend von hoher Qualität sind (Reinheit > 99%), in technischen Anwendungsbereichen wie dem Automobilbau, vereinzelt auch wieder im Elektro- /Elektronik Bereich (Grundig) zum Einsatz kommen und überwiegend einen Substitutionsgrad für Neuware von 1 aufweisen.
- Ähnlich wie der Aufwand für Sammlung, Transport und Sortierung ist im Fall von Kunststoffen aus EAG auch der Aufwand für die Demontage ökologisch nicht relevant.
- Umweltbelastung und Höhe der Materialverluste durch die Aufbereitung und Verwertung hängen vom gewählten Verfahren ab. Sie werden beim Modell „Grundig“ mit seiner weitgehend manuellen Sortierung und Trennung geringer ausfallen als bei der mechanischen Aufbereitung. Wirklich genaue Angaben dazu liegen derzeit nicht vor.

Unter rein ökologischen Gesichtspunkten lässt sich die stoffliche Verwertung für Kunststoffe aus EAG, die keine kritischen Additive enthalten, mit hoher Wahrscheinlichkeit als sinnvoll prognostizieren. Für Kunststoffe mit unerwünschten Zusatzstoffen bieten sich rohstoffliche und thermische Verfahren an, wobei in Österreich gegenwärtig nur thermische Verfahren zur Verfügung stehen. Eine Aussage, welches Verfahren dabei aus Sicht des ökologischen Nutzens zu bevorzugen ist, ist schwierig, da im Vergleich zur stofflichen Verwertung wesentlich mehr individuelle anlagenspezifische Einflüsse zu berücksichtigen sind wie z.B. Verbrennungstechnologie, Verbrennungstemperaturen, Kesselwirkungsgrad, emissionsmindernde Einrich-

tungen, Nutzenergieauskopplung, Abnahmestruktur für die Verwertungsprodukte Dampf und/oder Strom u.a.m.

Ökonomische Aspekte

Unter rein betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG derzeit nur in Ausnahmefällen rentabel. Die Kosten für die erforderlichen Sortier- und Demontageschritte müssen je nach Gerätegruppe und Demontageaufwand mit €0,22 bis 0,44/kg angesetzt werden, wobei die nachfolgend angewandte Aufbereitungstechnologie Einfluss nimmt. Die eigentlichen Aufbereitungskosten liegen je nach angestrebter Recyclatqualität und gewählter Technologie im Bereich von €0,22 bis 0,36/kg.

Die „traditionelle“ Aufarbeitung demontierter und sortierter Kunststoffteile kommt dabei mit Kosten von ca. €0,29 aus, die entsprechenden Kosten für die Herstellung von sortenreinem Kunststoffmahlgut durch mechanische Aufarbeitung vorsortierter Verwertungsklassen liegen im Bereich von €0,22 – 0,36/kg

Die Preise für die Übernahme von EAG liegen in Österreich je nach Gerätegruppe bei €11 -14/Stk. für Bildschirmgeräte, €0,15 - 0,30/kg für Kleingeräte, €25- 38/Stk. für Kühlgeräte und €5– 7/Stk. für Großgeräte.

Die auf dem Sekundärmarkt erzielbaren Erlöse für Mahlgut und Regranulat zeigen einerseits große Bandbreiten und unterliegen zusätzlich sehr großen Schwankungen in Abhängigkeit vom Preis für Primärware (Der Preis für ABS Primärware lag 1998 bei ca. €1,38, im Februar 2001 dagegen bei €2,54).

Man kann davon ausgehen, dass Recyclatpreise in etwa bei 50-70% der Neuwarenpreise liegen, wobei deutliche Abweichungen nach oben und auch nach unten möglich sind. Bei sehr hohen Primärpreisen und der damit meist eintretenden Materialknappheit steigt das Preisniveau für Recyclate entsprechend. Die pro Kunststoffsorte geringen verfügbaren Mengen erschweren den Aufbau von dauerhaften Liefer-/Abnahmebeziehungen zwischen Verwertern und Kunststoffverarbeitern, was die ökonomische Sinnhaftigkeit der Verwertung zusätzlich in Frage stellt.

Ökologisch/ökonomische Aspekte

Die Praxis der Kunststoffverwertung zeigt, dass unter rein ökologischen Gesichtspunkten sinnvolle und wünschenswerte Verfahren und Prozesse oft mit hohen ökonomischen Belastungen zu kämpfen haben. Vor allem die erforderlichen Vorbehandlungen Sortierung, Trennung, Demontage usw. sind kostenintensiv.

Die Anwendung von Kosten-Nutzen-Analysen versucht die Frage der Sinnhaftigkeit verschiedener Verfahren umfassender zu betrachten. Einige der in den letzten Jahren in Österreich durchgeführten Kosten-Nutzen Analysen befassen sich konkret auch mit der Verwertung von Kunststoffen aus Nicht-Verpackungen (19).

Zusammensetzung einer Kosten –Nutzen Analyse:

- Kosten der getrennten Sammlung und Sortierung
- Nettokosten der stofflichen Verwertung
- Nettokosten der thermischen Verwertung des Sortierrestes
- + Ersparte Kosten der Restmüllsammlung
- + Ersparte Nettokosten der Restmüllbehandlung und Deponierung
- = **Ergebnis der abfallwirtschaftlichen Nettokostenanalyse**
- + Ersparte Kosten der Primärproduktion und konventionellen Energieumwandlung (Substitutionseffekte)
- + Ersparte Kosten von Emissionsvermeidung und Deponiesanierung (externe Effekte)
- = **Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse**

Hutterer, Pilz et al. (19) unterziehen die Verwertung von Kunststoffen aus EAG einer Kosten-Nutzen Analyse und kommen dabei zu einem positiven Ergebnis:

Im Fall von Bildschirmgeräten und Kühlschränken ist bereits das Ergebnis der abfallwirtschaftlichen Nettokostenanalyse positiv, für Klein- und Großgeräte ergibt die abfallwirtschaftliche Nettokostenanalyse einen negativen Wert, das Gesamtergebnis ist allerdings positiv. Die stoffliche Verwertung von Kunststoffteilen aus EAG ist demnach sowohl unter ökologischen als auch volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll.

Die Ergebnisse der Studie sind im Hinblick auf die gegenwärtige reale Situation allerdings zu relativieren, da in der Betrachtung wesentliche Elemente für die Praxis der stofflichen Verwertung von Kunststoffen aus EAG wie die hohe Sortenvielfalt, die geringen verfügbaren Mengen, die Schadstoffproblematik sowie der Markt und die Akzeptanz für Recyclate keine Rolle spielen. Diesem Aspekt tragen die Autoren der Studie in

ihrer Schlussbetrachtung auch Rechnung, wenn sie für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG erst mittelfristig Handlungsbedarf sehen, da die notwendigen Mengen derzeit nicht verfügbar sind.

VIII. ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE

Unter technischen Gesichtspunkten stehen für die Verwertung von Kunststoffen aus EAG stoffliche, rohstoffliche und thermische Verfahren zur Verfügung. Für schadstoffhaltige Fraktionen kommt eine stoffliche Verwertung aus stoffpolitischen Gründen eher nicht in Frage. In Österreich werden derzeit keine Anlagen zur rohstofflichen Verwertung betrieben, in Deutschland stehen dafür Anlagen zur Druckvergasung zur Verfügung.

Die Kunststoffe in EAG liegen immer im Verbund mit anderen Werkstoffen vor, ihre Sortenvielfalt ist sehr hoch, ihre Konzentration ist bezogen auf das Produkt (Gerät) manchmal gering und sie besitzen zumindest in Einzelbereichen ein beachtliches Schadstoffpotenzial. Diesen Tatsachen ist bei der Verwertung Rechnung zu tragen. Gravierend sind die Auswirkungen im Bereich der stofflichen Verwertung: die vorhandenen „klassischen Verwertungsstrukturen“ müssen um die Demontage erweitert, die Sortierung den höheren Anforderungen durch Sortenvielfalt, Farbvielfalt und möglichem Schadstoffgehalt angepasst werden. Beide Verfahrensschritte sind sehr kostenintensiv. Als Alternative zu sortenreinen Materialströmen für die klassische Verwertungsrouten bietet sich die Anwendung einer adaptierten mechanischen Aufbereitung vorsortierter Geräte zur Herstellung sortenreiner Kunststoffmahlgüter an. Die stoffliche Verwertung ist unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten nur selten rentabel und spielt daher in der Praxis nahezu keine Rolle. Kunststoffe werden im Rahmen der heute üblichen Aufarbeitung von EAG als Reststoffe deponiert oder einer thermischen Behandlung zugeführt.

Trotz ungünstiger Rahmenbedingungen finden sich vereinzelt engagierte Ansätze, die stoffliche Verwertung zu realisieren. Diese Praxisbeispiele zeigen trotz unterschiedlichem technischen Zugang deutlich, dass für den Aufbau von langfristig auch ökonomisch rentablen stofflichen Verwertungswegen wesentliche Kriterium: Die Zusammenarbeit von Materiallieferanten, vertreten durch Demontage, Sortierung, Aufarbeitung und Regranulation, und Materialabnehmern, vertreten durch die Hersteller und Anwender von Kunststoffprodukten. Nur durch eine in der Produktion und Entwicklung von Primärkunststoffen bzw. in der Wirtschaft generell übliche Bedarfs- bzw. Kundenorientierung kann es gelingen, auch für Sekundärkunststoffe einen funktionierenden Markt aufzubauen. Anreize und Unterstützung durch Öffentlichkeit und Behörden sind ebenfalls notwendig.

Auch bei einer optimistischen Einschätzung der Zukunft der stofflichen Verwertung wird sie kurzfristig nur für wenige ausgewählte Materialien und auch mittel- bis langfristig nur für einen Teil der Kunststoffe aus EAG sinnvoll durchführbar sein. Die thermische Verwertung kann als wichtige Alternative all jene Kunststoffe aufnehmen, die nicht für die stoffliche Route geeignet sind. Der Einsatz in Müllverbrennungsanlagen stellt für schadstoffhaltige Fraktionen eine sichere Behandlungsvariante dar.

Voraussetzung für die Realisierung dieses Verwertungsweges ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Anlagenkapazität, die aber im Zusammenhang mit der Umsetzung der Deponieverordnung in Österreich zur Verfügung gestellt werden muss.

Die Verwertungsrouten über den Einsatz als Zusatzbrennstoff in industriellen Feuerungs- und Produktionsanlagen ist Kunststoffen aus EAG prinzipiell nicht verschlossen. Für welche Teilströme und für welche Anlagen diese Verwertungsrouten geeignet ist, darüber liegen noch wenig Erkenntnisse vor.

Ungeachtet der Tatsache, dass in Österreich keine Anlagen für eine rohstoffliche Verwertung zur Verfügung stehen, stellen diese Verfahren eine Verwertungsvariante dar, die unter ökologischen Gesichtspunkten mit thermischen Verfahren konkurrenzfähig ist. Besonders Vergasungsanlagen zeichnen sich durch hohe Inputflexibilität aus, arbeiten bei sehr hohen Temperaturen und stellen aus diesem Grund eine interessante Alternative zu Abfallverbrennungsanlagen dar. Die hohen Investitionskosten für derartige Anlagen sind nur bei Errichtung ausreichend hoher Anlagenkapazitäten vertretbar, sodass sich in Österreich nicht nur die Frage der Finanzierung, sondern auch die Frage der Auslastung und damit der Konkurrenzfähigkeit zur Verbrennung stellt.

I. EINLEITUNG

I.1 Projekt

Das gegenständliche Projekt zur Untersuchung der Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffteilen aus der Demontage von Elektroaltgeräten wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft im Rahmen eines offenen Verfahrens gemäß ÖNORM A 2050 ausgeschrieben.

Mit der Durchführung der Untersuchung wurde das Österreichische Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Sektion Österreichisches Kunststoffinstitut beauftragt. Die Leitung und Ausführung der Arbeiten erfolgte durch Frau Mag. Elisabeth Novak.

I.2 Inhalte und Ziele der Studie

Ziel der Studie ist es, einerseits grundsätzliche Verwertungstechnologien für die aus der Demontage von Elektroaltgeräten anfallenden Kunststoffe darzustellen, andererseits die aktuell genutzten Verwertungs- und Entsorgungswege aufzuzeigen sowie zukünftige Entwicklungen abzuschätzen.

Auf der Basis von Daten und Abschätzungen über das gegenwärtige Gesamtaufkommen von EAG, Informationen über den Einsatz von Kunststoffen in EAG und Erfahrungen aus der Demontage von EAG sollte zunächst das in EAG vorhandene Kunststoffpotenzial und seine Verteilung auf verschiedene Kunststoffarten sowie Gerätetypen bzw. -gruppen dargestellt werden.

Ausgehend von der Erhebung der technischen Möglichkeiten zur Verwertung von Kunststoffen aus EAG, die auch Verfahren und Konzepte für die Zukunft umfassen, werden die Sekundärmaterialien vorgestellt sowie die für die praktische Umsetzung der Verfahren notwendigen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen dargestellt. Für eine Beurteilung der aufgezeigten Verwertungswege und Recyclingverfahren sollen neben den technischen und wirtschaftlichen auch ökologischen Aspekte herangezogen werden.

Eine Gegenüberstellung mit der gegenwärtigen Situation soll realistische Wege und Möglichkeiten für die aktuelle und zukünftige Verwertung von Kunststoffen aus EAG in Österreich aufzeigen.

I.3 Angestrebte Ergebnisse

Als Ergebnisse wurden festgelegt:

- Darstellung des gegenwärtigen und zukünftigen Potenzials an Kunststoffen aus EAG unter Berücksichtigung
 - verschiedener Kunststoffarten
 - verschiedener Geräte und Gerätegruppen
 - Änderungen in der Materialzusammensetzung von Elektrogeräten

- Darstellung der für eine Verwertung von Kunststoffen aus EAG verfügbaren Verfahren in Österreich und den Nachbarländern unter Berücksichtigung folgender Parameter:
 - Qualität des Inputmaterials
 - Anforderungen an Demontage
 - Sekundärprodukte
 - Auf- und Umarbeitungskosten

- Aufstellung der Kunststoffströme aus EAG, die gegenwärtig unter Berücksichtigung ihrer Materialqualität und der verfügbaren Anlagenkapazitäten für eine Verwertung in Frage kommen.

- Abschätzung der Auswirkungen der Zunahme des Kunststoffanteils in EAG sowie der zu erwartenden Änderungen hinsichtlich Art und Qualität (Additive) der anfallenden Kunststoffe auf die zukünftige Verwertbarkeit.

- Betrachtung der ökologisch/ökonomischen Sinnhaftigkeit verschiedener Verwertungswege für Kunststoffe aus EAG.

II. ABFALLSTROM ELEKTROALTGERÄTE

II.1 Gesamtaufkommen EAG

Der Begriff EAG steht für ein sehr breites Spektrum verschiedenster Geräte, gekennzeichnet durch ihren komplexen Aufbau und große Materialvielfalt. Unter den Gesichtspunkten Erfassung, Behandlung und Verwertung erfolgt ihre Unterteilung in Gerätekategorien.

Derzeit weisen diese Gerätekategorien noch deutliche nationale Unterschiede auf. Im Zusammenhang mit der vorgesehenen EU-Richtlinie über Elektro- und Elektronikgeräte ist eine europaweit einheitliche Einteilung zu erwarten.

In Österreich erfolgt die Gerätezuordnung derzeit gemäß ÖNORM S 2106

Weiß Ware

Großgeräte: Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschinen, Herde

Kleingeräte: Haushaltsgeräte z.B. Kaffeemaschinen, Toaster, Mikrowellenherde Staubsauger, Föhn, Werkzeuge, Nähmaschinen, usw.

Braune Ware: Audiogeräte, TV-Geräte, Videogeräte

Büro-, IT-Technik: PC, Bildschirme, Drucker, Faxgeräte, Kopierer, Telefone u.ä.

Sonstiges: Medizinische Geräte, Beleuchtung, Kontroll- und Steuerinstrumente
Elektromotoren, Heizgeräte

In der Praxis der Sammlung und Aufbereitung hat sich in Österreich aber folgende einfachere und verwertungsbezogene Einteilung etabliert:

Großgeräte: Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Herde u.ä.

Kleingeräte: Haushaltsgeräte, Braune Ware, Büro-/IT-Technik, Spielzeug

Bildschirmgeräte: TV-Geräte, Monitore

Die Menge an Elektroaltgeräten, die jährlich als Abfall entsorgt werden, verteilt sich auf verschiedene Abfall- bzw. Altstoffströme und lässt sich derzeit nur abschätzen. Für genauere Mengenangaben fehlen detaillierte, alle möglichen Abfall- und Altstoffströme (inklusive Altgeräteexport) umfassende Analysen.

Die ersten Abschätzungen für Österreich gehen auf das Jahr 1993 zurück und bezifferten die anfallenden Mengen für das Jahr 1990 mit 80.000 t. Basierend auf Verkaufszahlen und Lebensdauerabschätzungen schätzte die betroffene Industrie das EAG-Aufkommen zu diesem Zeitpunkt um ca. 8.000 t geringer ein.

Unter Berücksichtigung der seit Mitte der 90iger Jahre gestiegenen Verkaufszahlen und der vor allem im Bereich der Computer- und Informationstechnologie immer kürzer werdenden „Produktlebensdauer“ kann davon ausgegangen werden, dass die derzeit in Österreich anfallende Menge an Altgeräten bei mindestens 100.000 t/a liegt. Diese Mengenabschätzung basiert auf einer Umrechnung deutscher Zahlen zum Anfall von EAG, die sich ihrerseits auf eine Erhebung des ZVEI sowie Industrieangaben zu den Verkaufssteigerungen bei verschiedenen Gerätegruppen stützen.

Tabelle II-1: Menge von EAG in Deutschland

	Menge 94	%	Zuwachs in % p.a.	Menge 98	%
IT-Geräte	110.000	7%	25%	220.000	12%
Haushaltsgeräte	600.000	37%	3%	672.000	37%
Unterhaltungselektronik	250.000	16%	6%	310.000	17%
Sonstige	540.000	40%	4%	626.400	34%
Summe	1.500.000			1.828.400	

Quelle: IHF, Jänner 2000

Tabelle II-2: Abschätzung des Mengenpotenzials an EAG in Österreich

	Menge 94	%	Zuwachs in % p.a.	Menge 98	%
IT-Geräte	5.600	7%	25%	11.200	12%
Haushaltsgeräte	29.600	37%	3%	33.152	34%
Unterhaltungselektronik	12.800	16%	6%	15.872	16%
Sonstige	32.000	40%	4%	37.120	38%
Summe	80.000			97.344	

Quelle: IHF, Jänner 2000

Die Umrechnung europäischer Daten zum Abfallaufkommen aus dem Bereich EAG für Österreich ergibt bereits für das Jahr 1995 eine geschätzte Abfallmenge von 120.000 t. (18,19,37). Die Verteilung der EAG auf die beiden Bereiche Konsumgüter (Geräte aus privaten Haushalten) und Investitionsgüter (Geräte aus Gewerbe und Industrie) wird im allgemeinen mit 60:40 angenommen. Ebenso wie bei den Gesamtmengenabschätzungen streuen auch hier die in Fachkreisen und in verschiedenen Ländern geltenden Annahmen.

Europaweit das Potenzial an alten Elektro- und Elektronikgeräten mit 10– 20 kg/EW abgeschätzt. Für den großen Streubereich sind sowohl verschiedene Annahmen für Gerätegewichte als auch unterschiedliche Definitionen für EAG aber auch unterschiedliche Ausstattungsgrade des privaten und industriellen Bereiches in verschiedenen Ländern verantwortlich.

In Österreich wird das Potenzial an EAG mit derzeit rund 13 kg/EW angenommen, wovon ca. 8 kg auf den privaten Bereich entfallen (32).

Tabelle II-3: Abschätzung des spezifischen Mengenpotenzials an EAG in Österreich

Jahr	Gesamt EAG t/a	Konsumgüter t/a	spez. Konsumgütermenge kg/EW.a
1990	80.000	48.000	6,0
1998	101.342	60.804	7,6
1999	104.382	62.629	7,8
2000	107.513	64.508	8,1
2001	110.739	66.443	8,3
2002	114.061	68.437	8,6
2003	117.483	70.490	8,8
2004	121.007	72.604	9,1
2005	124.638	74.782	9,3

Quelle: Salhofer (35)

II.2 Kunststoffe in EAG

SOFRES versuchte im Zuge seiner Erhebungen einerseits die Gesamtmenge der in den letzten 2 Jahrzehnten in Westeuropa produzierten Elektro- und Elektronikgeräte und die darin enthaltene Kunststoffmenge zu erfassen, andererseits die derzeit aus diesem Bereich anfallende Abfallmenge und das darin enthaltene Kunststoffpotenzial abzuschätzen.

Tabelle II-4: Entwicklung des Kunststoffanteils in Elektro- und Elektronikgeräten in Westeuropa
Absoluteinsatzmengen in 1000 t/a, Gewichtsanteile in %

	1980		1992		1995		2000*	
	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%
Haushaltsgeräte groß (Weiße Ware)	295	15	478	20	528	21	656	24
Unterhaltungselektronik (Braune Ware)	43	10	241	28	233	26	265	26
Informationstechnologie	3	10	86	16	113	16	198	18
Bürotechnik	3	7	34	10,5	39	10,5	54	12
Haushaltsgeräte klein	38	19	92	32	107	35	118	35
Telekommunikation	22	40	57	58	62	58	72	58
Medizintechnik	1	2	4	3	4	3	4	3
Elektrotechn. Anlagen	74	5	158	6	173	6,5	191	6,5
Kabel	403	25	690	25	870	25	995	25
Kunststoffeinsatz	882		1.840		2.130		2.550	
Kunststoffanteil	15,3		18,6		19,1		20	
Gesamtproduktion	5.770		9.880		11.150		12.750	

Quelle: SOFRES (37);*Daten 2000 Prognose

Bei einem geschätzten Gesamtaufkommen an EAG in Westeuropa von 5 230.000 t im Jahr 1995, entfielen gemäß SOFRES (37) 812.000 t auf Kunststoffe, was einem durchschnittlichen Kunststoffanteil von 16% entspricht. Die durchgeführte Prognose für 2000 rechnet mit einem Gesamtaufkommen an EAG von 5 300.000 t, einem Kunststoffanteil von 20% und einem Kunststoffpotenzial von 1 060.000 t. Die Grundlage für das abgeschätzte Kunststoffpotenzial in EAG bilden die Verbrauchszahlen der letzten 2 Jahrzehnte und ein theoretisches Modell zur Berechnung der Lebensdauer verschiedener Gerätegruppen.

Tabelle II-5: Geschätzte Kunststoffabfälle aus EAG nach Gerätegruppen (Westeuropa 1992 –2000)

	1992		1995		2000*	
	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%
Haushaltsgeräte groß (Weiße Ware)	268	43	317	39	361	34
Unterhaltungselektronik (Braune Ware)	37	6	65	8	117	11
Informationstechnologie	25	4	57	7	106	10
Bürotechnik	12	2	24	3	32	3
Haushaltsgeräte klein	56	9	65	8	96	9
Telekommunikation	32	5	41	5	53	5
Medizintechnik	-	0	-	0	-	0
Elektrotechn. Anlagen	44	7	57	7	74	7
Kabel	150	24	187	23	212	20
Gesamtmenge	624	100	812	100	1.063	100

Quelle: SOFRES (37); *Daten 2000 Prognose

Legt man diese Daten unter Anbringung einiger Korrekturen einer entsprechenden Abschätzung für Österreich zugrunde, so ergibt sich für das Jahr 1995 eine Gesamtmenge an EAG von 120.000 t mit einem Kunststoffpotenzial von 21.500 t, Hutterer und Pilz gehen in ihren Arbeiten zur Kosten-Nutzen-Analyse der Kunststoffverwertung für 1995 von einem Kunststoffpotenzial von 26.000 t/a im Bereich EAG aus (18,19).

Im Zusammenhang mit einer Abschätzung der Verwertungsmöglichkeiten für Kunststoffe aus EAG ist sowohl ihre Verteilung auf Gerätegruppen als auch auf verschiedene Kunststoffsorten von Interesse.

Als Basis für derartige Abschätzungen kommen einerseits Daten zum Kunststoffeinsatz in diesem Anwendungssektor in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten, andererseits Ergebnisse konkreter Zerlegeversuche in Frage.

Angaben zum Kunststoffeinsatz im Bereich Elektro- und Elektronikgeräte liegen auf europäischer Ebene vor (37, 41), wobei Untersuchungsergebnisse zur Sortenstruktur erst seit 1990 verfügbar sind. Daten aus Zerlegeversuchen sind aus Österreich, Deutschland, der Schweiz und den Niederlanden verfügbar.

Tabelle II-6: Einsatz verschiedener Kunststoffe in Elektro-/Elektronikgeräten 1995

	PVC	PE	PP	PS	ABS	PA	PC	PUR	And.	Σ
Haushaltsgeräte groß (Weiße Ware)	5%		34%	16%	16%	3%		23%	3%	100%
Unterhaltungselektronik (Braune Ware)	3%		1%	65%	4%		7%		20%	100%
Informationstechnologie, Bürotechnik	3%			2%	48%	3%	2%		42%	100%
Haushaltsgeräte klein	5%		44%	2%	18%	5%	4%		22%	100%
Telekommunikation					90%		10%			100%

Medizintechnik					90%				10%	100%
Elektrotechn. Anlagen						43%	3%		54%	100%
Kabel	56%	44%								100%

Quelle: SOFRES (37)

III. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN

III.1 Allgemeines zur Kunststoffverwertung

Für die Verwertung von Kunststoffen bieten sich grundsätzlich drei Wege an, die sich sowohl hinsichtlich der angewandten Verfahrenstechnik, der Art und Qualität der gewonnenen Sekundärmaterialien als auch im Verwertungsgrad unterscheiden.

- Die stoffliche oder werkstoffliche Verwertung
- Die rohstoffliche oder chemische Verwertung
- Die thermische Nutzung/Verwertung

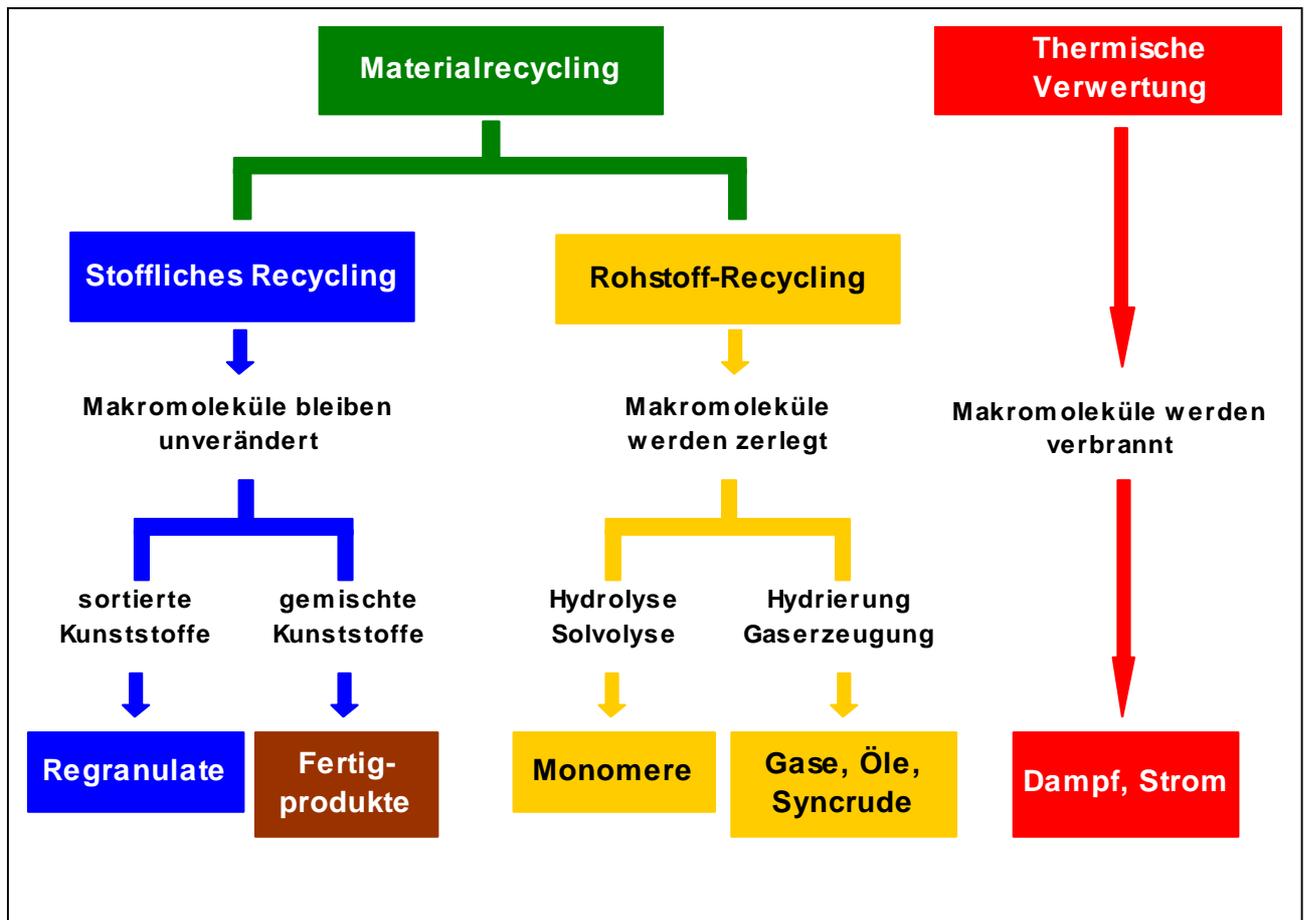


Abb. III-1: Verwertungsmöglichkeiten für Kunststoffe

III.2 Stoffliche Verwertung

III.2.1 Allgemeines

Die stoffliche Verwertung von Kunststoffen erfolgt ausschließlich mit Hilfe mechanischer und physikalischer Prozesse. Der chemische Aufbau und die Molekülstruktur der Kunststoffe werden dabei nicht verändert und damit bleiben auch ihre Eigenschaften grundsätzlich erhalten. Äußere Einflüsse, denen Kunststoffprodukte während ihres Gebrauches ausgesetzt sind, sowie die thermische Belastung beim Umschmelzen beeinflussen die Eigenschaften von Regranulaten in der Praxis aber doch. Während z.B. Eigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit eher wenig beeinflusst werden, beobachtet man allgemein eine Abnahme von Zähigkeit und Schlagzähigkeit. Verschlechterungen treten auch bei optischen Eigenschaften auf und manchmal auch hinsichtlich der Langzeitgebrauchseigenschaften. Im Bereich der Verarbeitungsparameter ändert sich v.a. das Fließverhalten.

III.2.2 Verfahren

Die stoffliche Verwertung liefert als Sekundärprodukte Mahlgüter oder Regranulate. Während Mahlgüter durch Zerkleinern, Trennen, Waschen und Trocknen entstehen, beinhaltet die Regranulatherstellung als zusätzlichen Verfahrensschritt ein Aufschmelzen und Granulieren der Kunststoffe. Die Granulatform entspricht wieder jener Form, in der auch Neuware in der Kunststoffverarbeitung zum Einsatz kommt.

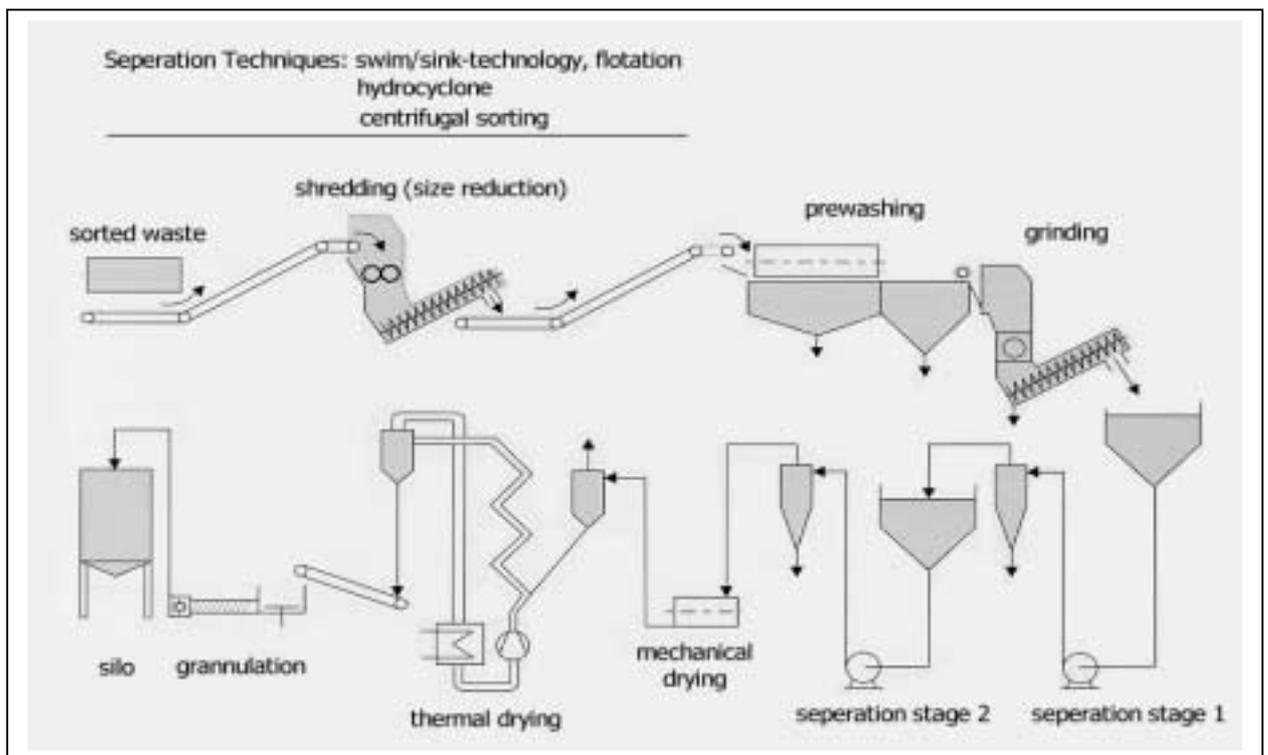


Abb. III-2: Verfahrensschema der stofflichen Verwertung

Wesentliche Voraussetzung für die stoffliche Verwertung ist eine Sortierung nach Kunststoffarten. Aufgrund der chemischen Unverträglichkeit vieler Kunststoffe sowie unterschiedlicher Schmelztemperaturen bildet ein Gemisch von Kunststoffen keine homogene Schmelze: Bei ähnlichen Schmelztemperaturen liegen infolge chemischer Unverträglichkeit verschiedene flüssige Phasen nebeneinander vor, bei sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen ist die geschmolzene Phase mit unaufgeschmolzenen Teile durchsetzt. Inhomogene Schmelzen erschweren die Herstellung eines Granulates oder machen sie im Extremfall unmöglich.

		Überschusskomponente																
		ABS	ASA	PA	PBT	(PBT+PC)	PC	(PC+ABS)	(PC+PBT)	PE	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PS	PVC	SAN
Mischungskomponente	ABS	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich
	ASA	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich
	PA	bedingt verträglich	bedingt verträglich	unverträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PBT	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich	verträglich
	(PBT+PC)	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich	verträglich
	PC	verträglich	verträglich	unverträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich
	(PC+ABS)	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich
	(PC+PBT)	verträglich	verträglich	unverträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich
	PE	unverträglich	unverträglich	bedingt verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PET	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich
	PMMA	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	verträglich
	POM	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PP	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PPO	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PS	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
	PCV	verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich
SAN	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	verträglich	bedingt verträglich	bedingt verträglich	verträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	unverträglich	

■ unverträglich
 ■ verträglich
 ■ bedingt verträglich

Abb. III-3: Verträglichkeit verschiedener Kunststoffe

Da die Verarbeitung von Regranulaten abermals durch Formen über die Schmelze erfolgt, tritt bei Verwendung von schlechtem Regranulat oder gemischtem Mahlgut dasselbe auf, wie bei der Granulatherstellung: Es bildet sich keine homogene Schmelze und die verschiedenen Materialphasen bleiben im abgekühlten Zustand auch im Produkt erhalten, was deutliche Eigenschaftseinbußen zur Folge hat: An den Phasengrenzen herrschen nur sehr schwache Bindungskräfte, wodurch diese Stellen besonders schadensanfällig sind. Die Schaffung sortenreiner Kunststofffraktionen stellt somit die wichtigste Voraussetzung für die stoffliche Verwertung dar.

III.2.3 Sortieren von Kunststoffen

Die Sortierung hat die Trennung von Stoffgemischen aufgrund unterschiedlicher chemisch-physikalischer Eigenschaften zum Ziel. Für die Sortierung von Kunststoffgemischen kommen folgende Eigenschaften in Betracht:

- Dichte
- Benetzbarkeit
- elektrische Eigenschaften
- chemische Eigenschaften
- optische Eigenschaften
- Magnetisierbarkeit

Die auf Dichteunterschieden basierenden Verfahren der **Schwimm/Sink-Trennung** sowie des **Hydrozyklons** sind in der Praxis häufig im Einsatz, werden allerdings meist zur Abtrennung von Fremdkunststoffen und Störstoffen aus bereits vorsortierten Fraktionen verwendet. Mit Wasser als Trennmedium eignen sie sich sehr gut zur Gewinnung von hochreinen Polyolefinfraktionen (Polyethylen- oder Polypropylenfraktionen).

Die eigentliche Sortierung von Kunststoffgemischen erfolgt heute überwiegend manuell durch **Handklauen**. Die Sortierkriterien sind in der Regel produktbezogen und so gewählt, dass mit der Erfassung eines bestimmten Produktes auch die Erfassung eines Kunststoffes einhergeht. Im Verpackungsbereich, dem gegenwärtigen Hauptanwendungsgebiet für die Kunststoffsortierung, sind auf diese Weise ausreichend sortenreine Fraktionen zugänglich.

Die gesetzliche Verpflichtung zur Verwertung von Kunststoffverpackungen hat zu einem deutlichen Entwicklungsschub beim Bau von automatischen Identifizierungs- und Sortieranlagen geführt. Speziell für die Verpackungssortierung stehen daher bereits praxistaugliche Anlagen auf Basis der **Nah-Infrarot-Spektroskopie** zur Verfügung und im Einsatz. Sie bewähren sich vor allem für die Sortierung von Flaschenfraktionen.

Für die Identifizierung dunkel eingefärbter Kunststoffe eignet sich die Nah-Infrarot-Spektroskopie allerdings nicht und damit kommt sie für Kunststoffe aus EAG nicht in Frage. Darüber hinaus sind für eine sinnvolle und recyclinggerechte Sortierung von Kunststoffen aus EAG zusätzlich Informationen über Füllstoff- und Additivgehalt unerlässlich: Zum einen, um Kunststoffe mit kritischen Additiven wie z.B. bromierten Flammschutzmitteln oder Schwermetallverbindungen aussondern zu können, zum anderen, um auch Kunststoffe trennen zu können, die zwar derselben Sorte zuzuordnen sind, aber z.B. aufgrund unterschiedlicher Füllstoffgehalte (z.B. Glasfasern) für eine gemeinsame Verwertung nicht geeignet sind. Vor dem Hintergrund der beiden EU-Richtlinien über Altfahrzeuge sowie elektrische und elektronische Geräte und den damit verbundenen Anforderungen an die Kunststoffverwertung ist die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit in diesem Bereich sehr rege.

Es stehen Anlagen im Labor- und Pilotmaßstab zur Verfügung, der entscheidende Schritt zur Einsatztauglichkeit muss allerdings noch erfolgen. Für die Identifizierung der Kunststoffe kommen Mittel-Infrarot-Spektroskopie, Laser-Puls-Thermographie oder Laser Induzierte Plasma-Spektroskopie in Frage, letztere eignet sich für die Additiverkennung.

Grundsätzlich ist die Handklaubung auch für die Sortierung von Kunststoffen aus EAG geeignet und kommt vereinzelt auch zum Einsatz. Sie erfordert im Gegensatz zur Verpackungssortierung ein gewisses Maß an Wissen und/oder Erfahrung des Sortierpersonals im Umgang mit Kunststoffen. Während im Verpackungsbereich nur 5 verschiedene Kunststoffsorten zum Einsatz kommen, sind es im Fall von Elektro-/Elektronikgeräten mindestens 10 unterschiedliche Materialien, die sich zudem nicht so eindeutig bestimmten Produktteilen zuordnen lassen. Die manuelle Sortierung von Kunststoffen aus EAG ist auch immer in engem Zusammenhang mit der Demontage zu sehen.

III.2.4 Trennung über selektives Lösen

Diese bisher lediglich im Labor- und Pilotmaßstab erprobte Trenntechnologie nutzt die unterschiedliche Löslichkeit verschiedener thermoplastischer Kunststoffe in organischen Lösungsmitteln. Durch die geeignete Wahl von Temperatur und Art des Lösungsmittels lassen sich aus einem Kunststoffgemisch stufenweise reine Polymerlösungen abtrennen, aus denen nach dem Abdampfen des Lösungsmittels die reinen Polymerfraktionen zurückbleiben. Erste Arbeiten über diese Möglichkeit der Kunststofftrennung wurden in den USA publiziert. In Deutschland beschäftigen sich Wissenschaftler der Technischen Universität Berlin eingehend mit diesem Thema. Das Fraunhoferinstitut für Verfahrenstechnik und Verpackung hat ein Verfahren zur Rückgewinnung von Weich-PVC auf der Basis einer selektiven Lösung/Fällung entwickelt und bietet ein ähnliches Verfahren für die Rückgewinnung von ABS aus E & E Kunststofffraktionen an. Es handelt sich bei

all diesen Verfahrensentwicklungen entweder um Neuentwicklungen, die noch nicht patentrechtlich geschützt sind, oder wie im Fall des Fraunhoferinstitutes um Arbeiten im Auftrag einzelner Unternehmen. Detailinformationen über die Verfahren, die Anlagentechnologie, die eingesetzten Lösungsmittel, die Qualität der Produkte usw. sind daher so gut wie nicht zugänglich.

Die DKR (Deutsche Gesellschaft für Kunststoff-Recycling GmbH), die in Deutschland für die Verwertung der gesammelten Kunststoffverpackungen verantwortlich ist, entwickelt derzeit gemeinsam mit der TU Berlin und einem Anlagenbauer in Frankfurt ein Verfahren zur Herstellung von Polyolefinblends aus Mischkunststoffen über selektives Lösen.

Das Verfahren mit dem Namen **PRL (PolymerRecycling über Lösen)** geht von gemischten Polyolefinagglomeraten aus, die über eine Nassaufbereitung mit Schwimm/Sinktrennung aus der Mischfraktion der Verpackungssammlung (65% Polyolefine) gewonnen werden. Die Polyolefinagglomerate werden in Rührkesseln unter Zugabe eines für Polyolefine spezifischen Lösungsmittels gelöst. Nach der Abtrennung nicht gelöster Verunreinigungen erfolgt eine stufenweise Abtrennung der einzelnen Polymeren. Die Trennung basiert auf dem unterschiedlichen Kristallisationsverhalten der drei Polyolefine PE-HD, PE-LD und PP bei unterschiedlichen Temperaturen und Rührgeschwindigkeiten. Als Endprodukte liefert das Verfahren drei Polyolefinblends mit einem Mindestgehalt der Hauptkomponente von 95%.

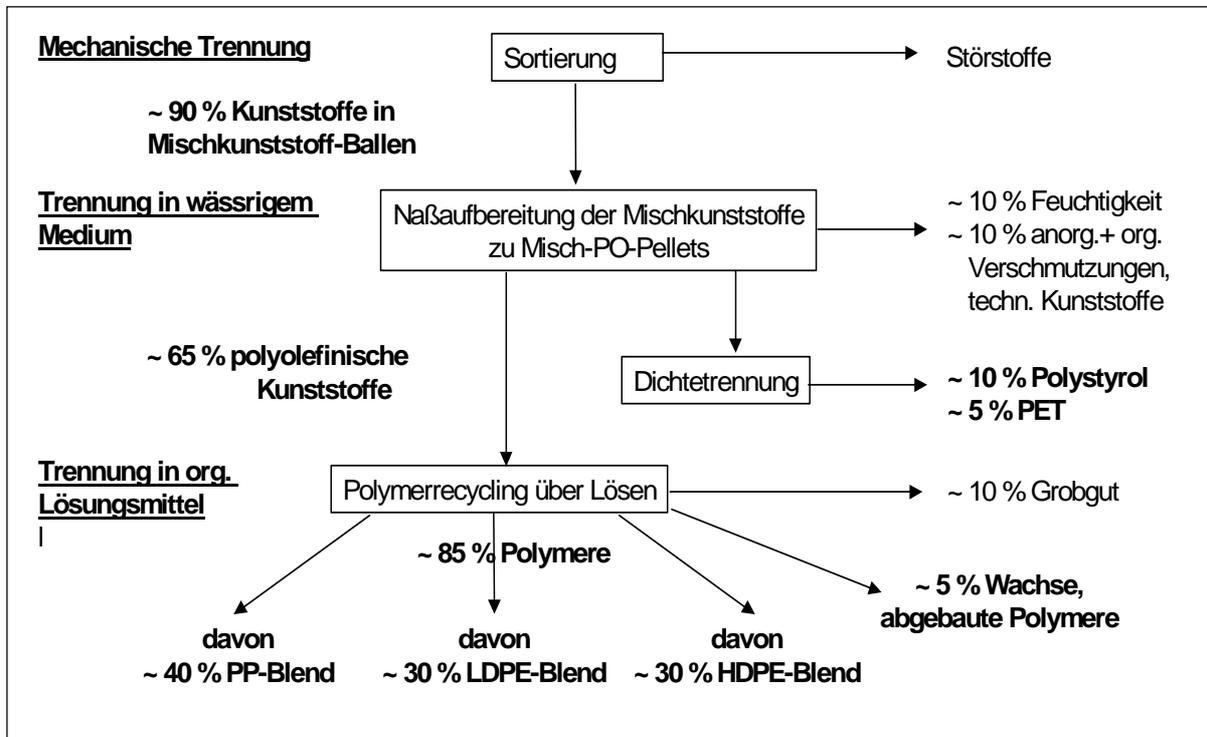
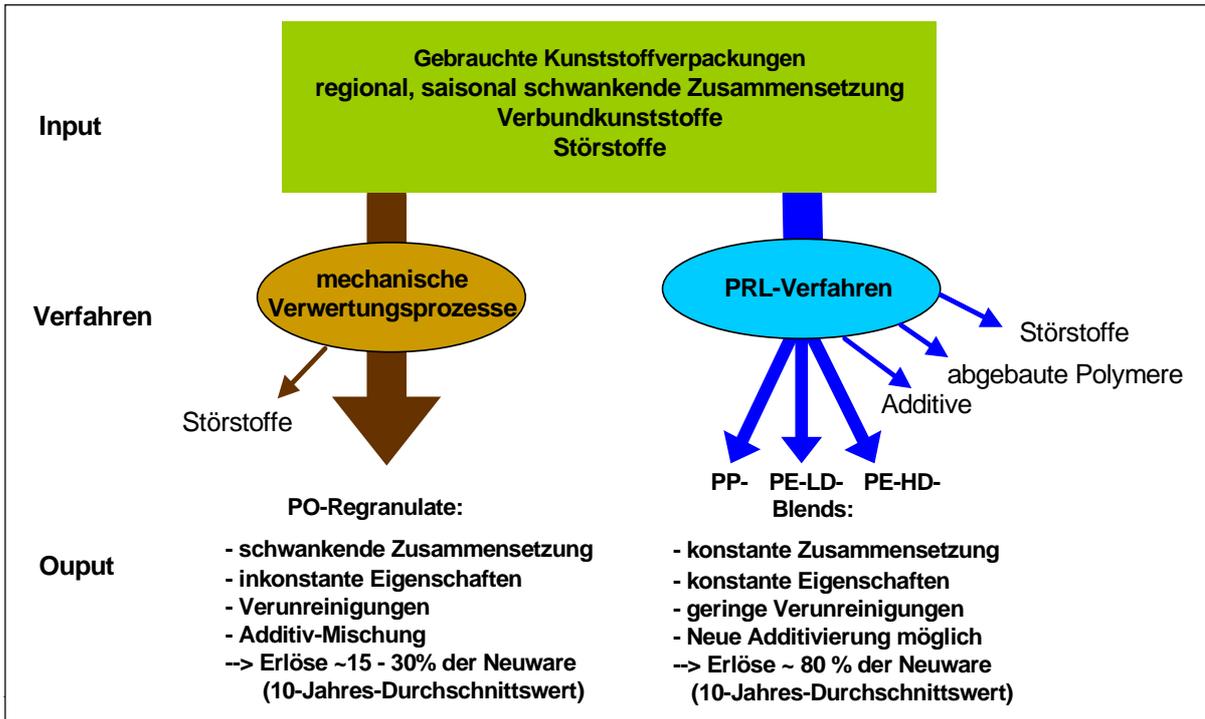


Abb. III-4: Schematischer Ablauf des PRL-Verfahrens (DKR, Thiele, Lindner)

Das PP-Blend wurde bisher in einer Menge von 250 kg hergestellt und umfangreichen Untersuchungen zur Materialcharakterisierung sowie praktischen Einsatzversuchen zur Herstellung von Luftfiltergehäusen unterzogen. Die Eigenschaften des PRL-PP-Blends liegen im Bereich der entsprechenden Neuware, die Produkteigenschaften der Recyclingprodukte entsprachen denjenigen von Produkten aus Neuware. Analoge Untersuchungen für PE-Blends müssen noch erfolgen.

Angaben der DKR zufolge laufen derzeit intensive Untersuchungen der Kernprozesse, Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit und Abschätzungen der Marktverhältnisse. Auf der Basis der Untersuchungsergebnisse soll im ersten Halbjahr 2001 die Entscheidung über den Bau einer Pilotanlage fallen.



Die Vorteile des Verfahrens liegen zweifelsohne in seiner über die Wahl des/der Lösungsmittel(s) sehr großen Flexibilität, der hohen erzielbaren Produktqualität und der Möglichkeit, Additive, die Einsatzmöglichkeiten für Regranulate oft drastisch beschränken, entfernen zu können. Demgegenüber steht der Einsatz von organischen Lösemitteln, der hohe Anforderungen an die Anlagentechnologie stellt und unter ökologischen Gesichtspunkten auch bei einer Kreislaufführung des Lösemittels nicht unkritisch ist.

Die aufgrund der anspruchsvollen Technologie zu erwartenden hohen Investitionskosten für die Errichtung einer technischen Anlage sind nur unter der Voraussetzung einer entsprechend hohen Anlagenskapazität wirtschaftlich vertretbar. In der Praxis bedeutet das aber auch, dass der notwendige kontinuierliche Inputstrom gesichert sein muss. Im Bereich der Verpackungskunststoffe mit ihrem sehr eingeschränkten Sortenspektrum und der Dominanz der Polyolefine ist das gut vorstellbar. So geht die DKR in ihren Überlegungen davon aus, den gesamten Mischkunststoffstrom aus der Verpackungssammlung von ca. 200.000 t/a in einer Anlage dem PRL-Verfahren zuzuführen – vorausgesetzt die laufenden Untersuchungen sowie der Bau und Betrieb der Pilotanlage verlaufen positiv.

In anderen Bereichen ließe sich nur durch eine Bündelung der Kunststoffströme aus verschiedenen Abfallbereichen wie z.B. Automobil, EAG die nötige Inputmenge bereitstellen. Das Lösemittelverfahren könnte auch das Problem mildern, dass sich an sich gleiche Kunststoffe je nach Einsatzbereich (Verarbeitungsverfahren) vom Typ her doch unterscheiden, was bei der stofflichen Verwertung über Regranulation Schwierigkeiten bereitet.

III.2.5 Trennung über selektives Erweichen

Das unterschiedliche Verhalten verschiedener thermoplastischer Kunststoffe beim Erwärmen soll die Basis eines neuen Sortier- und Trennverfahrens für Mischkunststoffe bilden, das von den Fa. Salyp ELV in Ieper in Belgien und ÖKUTEC in Siegen entwickelt wird.

Die Trennung der Kunststoffe erfolgt gemäß diesem Verfahrenskonzept über ihre unterschiedlichen Erweichungstemperaturen und nutzt die bei der Erweichung eintretende Änderung des physikalischen Verhaltens zur Abtrennung einzelner Kunststoffe. Wesentlich für die Abtrennung ist, dass der Kunststoff erweicht aber nicht schmilzt. Der Erweichungsbereich der meisten Kunststoffe erstreckt sich über einen Temperaturbereich von ca. 10°C und liegt deutlich unter dem Fließbereich.

Praktisch wird der Vorgang wie folgt beschrieben: Der Mischkunststoffstrom wird solange erwärmt, bis die Erweichungstemperatur des Kunststoffes mit der niedrigsten Erweichungstemperatur erreicht ist. Der erwärmte Kunststoffstrom gelangt in einen aus Stahlrollen bestehenden Separator, wobei paarweise angeordneten Rollen mit regulierbarem Druck gegeneinander gedrückt werden. Jeweils eine der beiden Rollen weist eine strukturierte Oberfläche auf, an der erweichte Kunststoffteilchen haften bleiben und im nächsten Schritt mechanisch von den Rollen entfernt werden. Für die Auftrennung eines Gemisches ist die kaskadenartige Anordnung von Erwärmen und Abtrennen vorgesehen.

Die weitere Behandlung der abgetrennten Kunststoffe sieht vor, das bereits erweichte Material geringfügig weiter zu erwärmen und soweit zu plastifizieren, dass es sich durch Schlitzpressen zu einer Platte verarbeiten lässt. Aus dieser Platte sollen durch Stanzen Pellets produziert werden. Diese Weiterverarbeitung hat gegenüber einer klassischen Regranulierung über Extrusion, den Vorteil, dass sie auch batchweise betrieben werden kann.

Die Erwärmung der Kunststoffe erfolgt in einem von ÖKOTEC entwickelten Infrarot Trommeltrockner, der sich für die Herstellung größerer Mengen erweichter aber noch frei fließender Kunststoffe eignet. Die Anwendung von IR Strahlung zur Erwärmung ermöglicht es, das Problem der überlappenden Erweichungsbereiche mancher Kunststoffe zu lösen. Die Abstimmung der verwendeten Strahlungsquelle und ihres Emissionsspektrums mit den Absorptionsbanden der zu trennenden Kunststoffe soll selbst bei überlappenden Erweichungsbereichen eine selektive Erweichung einzelner Kunststoffe ermöglichen.

Tabelle III-1: Erweichungsbereich verschiedener Kunststoffe

Kunststoffart	Erweichungsbereich °C
PVC	85 -100
PS	100-110
PE	125-135
ABS	130-135
PP	130-140
PA	145-155
POM	155-160
PC	165-175
PET	185-195

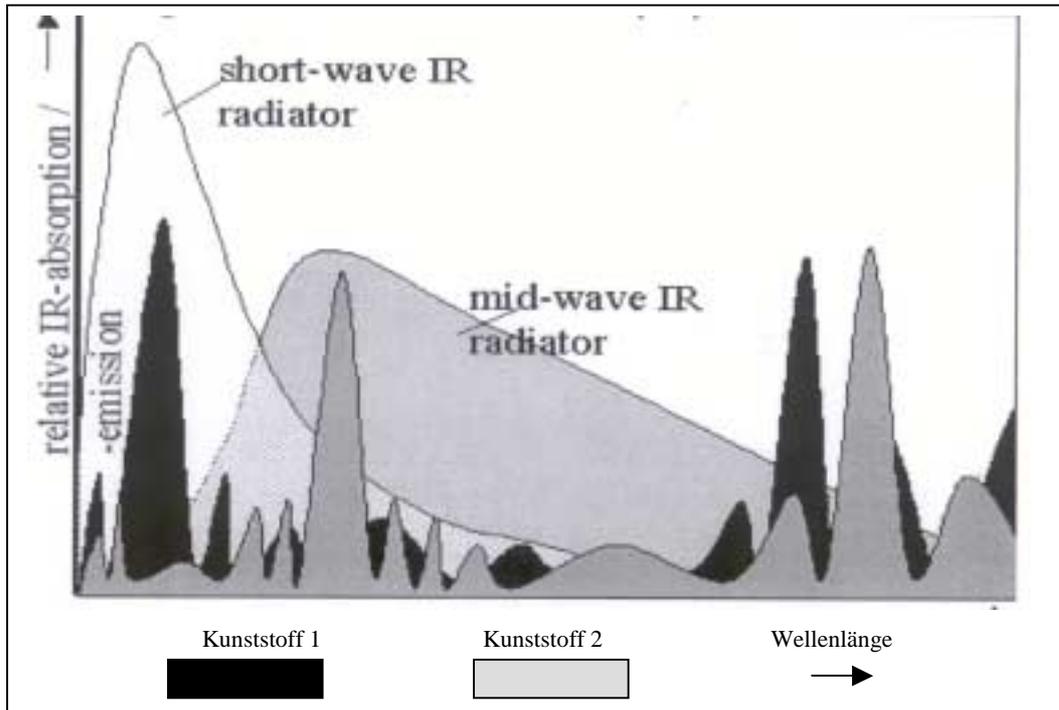


Abb. III-5: Prinzip der Trennung von Kunststoffen mit überlappenden Erweichungsbereichen durch Anwendung unterschiedlicher Strahlungsquellen

Das Verfahren wurde in Form eines Labormodells auf der „Recycla Europe 99“ vorgestellt, der Nachweis der praktischen Umsetzbarkeit muss allerdings noch erbracht werden. Dies soll durch den Betrieb einer Pilotanlage geschehen, die sich im SALYP ELV Center n.v. in Belgien im Bau befindet und voraussichtlich im April 2001 in Betrieb gehen soll.

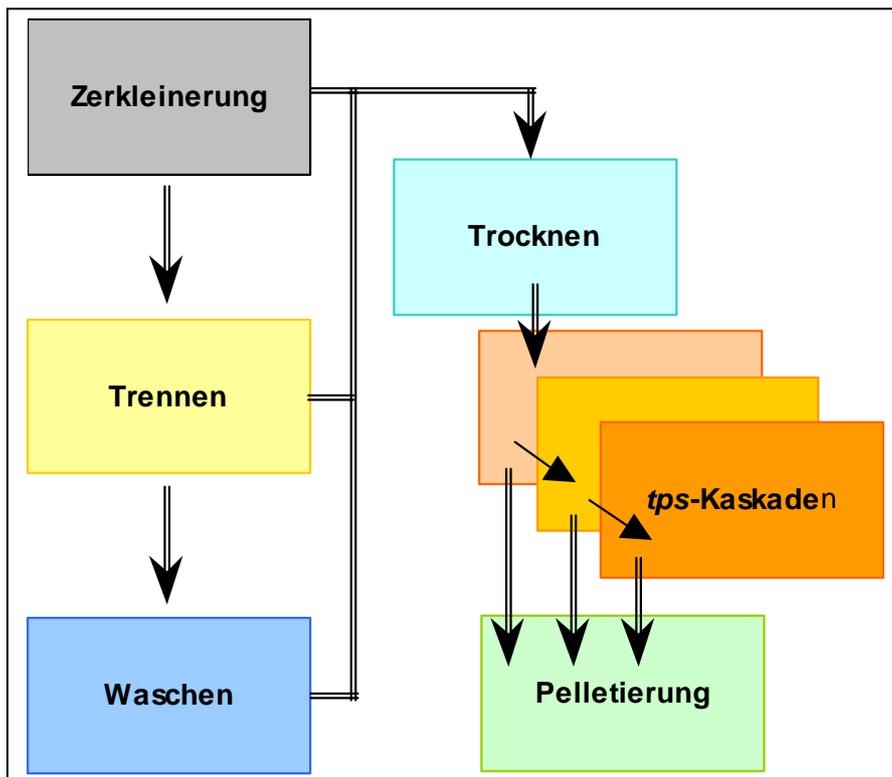


Abb. III-6: Schematisches Verfahrenskonzept für tps

III.3 Rohstoffliche oder chemische Verwertung

III.3.1 Allgemeines

Die rohstoffliche oder chemische Verwertung von Kunststoffen führt über den chemischen Abbau der Makromoleküle zu niedermolekularen chemischen Grundstoffen. In Abhängigkeit vom angewandten Verfahren handelt es sich bei den gewonnenen Sekundärrohstoffen um Gemische gasförmiger und/oder flüssiger Kohlenwasserstoffe. Für Polykondensate und Polyaddukte wie z.B. Polyester, Polyamide oder Polyurethane ist die Rückspaltung in die für ihre Herstellung eingesetzten Monomere möglich.

III.3.2 Verfahren und Beispiele

An technischen Verfahren stehen für eine rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen die klassischen Konversionsverfahren der Erdöl- und Kohlechemie zur Verfügung: Die **Hydrierung**, die **Vergasung** (Herstellung von Synthesegas) und mit Einschränkungen die **Pyrolyse**. Für Polykondensate bietet sich zusätzlich die **Hydrolyse** bzw. Alkoholyse an.

Die **Hydrierung** basiert verfahrenstechnisch auf dem sogenannten „Bergius-Pier-Verfahren“, das ursprünglich zur Kohleverflüssigung und später für die Aufarbeitung von Raffinerierückständen zum Einsatz kam. 1992 wurde in Deutschland in einer bestehenden Hydrieranlage der VEBA OEL AG in Bottrop erstmals die Hydrierung von gemischten Altkunststoffen praktisch erprobt.

In einem Sumpfpfhasenreaktor werden die jeweiligen Einsatzstoffe durch Behandlung mit Wasserstoff bei Temperaturen von 400-500°C und einem Druck von 150-250 bar zu flüssigen Kohlenwasserstoffen konvertiert. In Bottrop war unter dem Eindruck der beiden Ölkrisen 1981 eine Kohlehydrieranlage errichtet und bis 1987 betrieben worden. 1988 erfolgte die Umrüstung für den Betrieb mit Vakuumrückständen und die Aufarbeitung von industriellen Reststoffen nach dem Veba-Combi-Cracking (VCC) Verfahren. Die Anlage produzierte eine Art synthetisches Rohöl „Syn crude“, das problemlos in konventionelle Raffinerien eingespeist werden konnte (Anforderung: Chlorgehalt < 1ppm).

In einem Großversuch wurden 1992 Kunststoffe aus der Verpackungssammlung den Vakuumrückständen beigemischt und erfolgreich dem Hydrierprozess unterzogen. Die Anforderungen an die Pumpfähigkeit des Einsatzstoffes beschränkten den möglichen Kunststoffzusatz zunächst auf max. 20%.

1993 wurde die Anlage um eine Depolymerisationseinheit erweitert, in der bei Temperaturen von etwa 350°C ein thermischer Abbau der Makromoleküle vorgenommen wurde. Durch diese Vorbehandlung lagen die Altkunststoffe in der für das Verfahren adäquaten flüssigen, pumpfähigen Form vor, wodurch höhere Kunststoffanteile im Einsatzmix möglich waren.

Für die Hydrierung eignen sich alle Kunststoffe und eine Sortierung ist nicht notwendig. Füllstoffe, Pigmente und auch Halogene stören den Prozess nicht. Letztere werden großteils bereits bei der Depolymerisation abgetrennt, verbleibende Reste werden beim Hydrierprozess zu Halogenwasserstoffen umgesetzt und in einer Gaswäsche entfernt. Die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Materialien beeinflusst allerdings die Ausbeute an Syn crude. So liefern Polyolefine die höchste Ausbeute, während Kunststoffe mit einem hohen Anteil an Heteroatomen wie z.B. PUR (viel Stickstoff und Sauerstoff im Molekül) bei höherem Wasserstoffverbrauch zur Absättigung der Heteroatome deutlich weniger Syn crude liefern.

Von 1994 bis Ende 1999 wurden in Bottrop jährlich 60.000-80.000 t DSD-Kunststoffe zu Syn crude hydriert. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde die Anlage, deren Betrieb ursprünglich bis 2003 vorgesehen war, Ende 1999 vorzeitig stillgelegt.

Die Hydrierung der Altkunststoffe nach dem VCC-Verfahren liefert ein qualitativ hochwertiges Produkt und wurde in einer vergleichenden Untersuchung verschiedener Kunststoffverwertungsverfahren auch unter ökologischen Gesichtspunkten positiv bewertet. Wirtschaftlich kann das Verfahren derzeit gegen alternative Verfahren wie z.B. den Einsatz als Reduktionsmittel im Hochofen oder auch die Herstellung von Synthesegas nicht bestehen. Die Kosten für die Bereitstellung von Syn crude als Raffinerierohstoff sind 2-3 mal so hoch (abhängig vom Ölpreis) wie für die Bereitstellung von Rohöl.

Die **Vergasung** von kohlenstoffhaltigen Materialien hat die Gewinnung von Synthesegas - ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff - zum Ziel. Als Vergasungsmittel dienen Sauerstoff oder Luft und Wasserdampf.

Für das gewonnene Synthesegas stehen im wesentlichen drei Verwendungsoptionen zur Verfügung:

- Einsatz zur Synthese von Grundchemikalien wie z.B. Methanol
- Erzeugung von Wasserstoff
- Erzeugung von Brenngas

Für die technische Durchführung von Vergasungen stehen eine Reihe unterschiedlicher Verfahrenskonzepte und Anlagen zur Verfügung. Die Wahl des Verfahrens wird maßgeblich von der Beschaffenheit der Einsatzstoffe bestimmt.

Die Vergasung hat ihren Ursprung ähnlich wie die Hydrierung im Bereich der Kohlechemie. Durch die Ablöse von Kohle als Rohstoff- und Energiequelle durch Erdöl und Erdgas - heute basieren z.B. 80 % der Synthesegasproduktion auf der Reformation von Erdgas - hat sich der Anwendungszweck von Vergasungsverfahren verschoben: Die stoffliche oder thermische Verwertung (je nach Verwendung des Synthesegases) von minderwertigen oder schadstoffhaltigen Brennstoffen, die für eine direkte Verbrennung nicht oder nur unter erheblichem technischen Aufwand in Frage kommen, sind Motive für deren Vergasung. Die Vergasung von schwefelhaltigen Vakuumrückständen aus der Erdölraffination, von heizwertarmer Braunkohle oder Abfallstoffen ist unter diesem Gesichtspunkt zu sehen.

Ähnlich wie im Fall der Hydrierung eignen sich Kunststoffe aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung gut als Rohstoffbasis für die Herstellung von Synthesegas. Unter dem Eindruck der Verpackungsverordnung wurden in Deutschland von der EWvK (Entwicklungsgesellschaft für die Wiederverwertung von Kunststoffen) in der Zeit von 1992-1997 eine Reihe experimenteller Versuche zur Vergasung von Altkunststoffen durchgeführt. Kunststoffe aus der DSD-Sammlung wurden in bestehenden industriellen Vergasungsanlagen gemeinsam mit flüssigen und festen Einsatzstoffen eingesetzt und die Machbarkeit dieses Verwertungsweges - mit positiven Ergebnissen - untersucht.

Großtechnisch werden Kunststoffabfälle heute im **Sekundärverwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ)** für die Herstellung von Synthesegas genutzt. Sie kommen in dieser Anlage gemeinsam mit Kohle und anderen Abfallstoffen zum Einsatz. Das erzeugte Synthesegas wird direkt im SVZ zu Methanol umgesetzt.

Auch die **Pyrolyse** bietet grundsätzlich die Möglichkeit aus gemischten Altkunststoffen verwertbare Rohstoffe in Form von Ölen und Gasen zu gewinnen. Die Pyrolyse von Kunststoffen und Abfallstoffen war v.a. in den 70iger und 80iger Jahren Gegenstand zahlreicher grundlegender wissenschaftlicher Untersuchungen, die von Praxisversuchen in Pilotanlagen begleitet wurden. An der Universität Hamburg wurden umfangreiche Arbeiten zur Pyrolyse von Kunststoffabfällen in einem Wirbelschichtreaktor durchgeführt.

Aufbauend auf den wissenschaftlichen Ergebnissen und Erfahrungen aus dem Betrieb von Pilotanlagen erfolgte der Bau einiger technischer Pyrolyseanlagen für die Behandlung verschiedener Abfälle wie z.B. Alttreifen, verunreinigte Böden, Kunststoffabfälle u.ä.. Sie wurden mit unterschiedlichem Erfolg betrieben. Die überwiegende Zahl musste den Betrieb nach relativ kurzer Zeit einstellen, wobei die Gründe dafür sowohl technischer als auch ökonomischer Natur waren. Das eigentliche Ziel, die Pyrolyse zur Gewinnung petrochemischer Grundstoffe einzusetzen, scheiterte grundlegend und zwar aus mehreren Gründen.

Die günstigen Rohölpreise (zumindest bis 1999) machten die alternative Herstellung von Ölen unwirtschaftlich. Ein weiteres Problem stellt sich im Bereich der lieferbaren Produktmengen: Die Petrochemie arbeitet in Größenordnungen von Millionen Tonnen/a, im Abfallbereich sind Anlagen mit einem Jahresdurchsatz von 100.000 t Großanlagen. Die in derartigen Anlagen herstellbaren Mengen an Pyrolyseöl liegen zwischen 20.000 und 30.000 Jahrestonnen und sind damit um zwei Größenordnungen zu klein um im Wettbewerb mit der Petrochemie bestehen zu können.

In wenigen Einzelfällen kommt die Pyrolyse derzeit zur Abfallbehandlung zum Einsatz. Die heutigen Anlagenkonzepte sehen in der Pyrolyse ein Vorbehandlungsverfahren für eine thermische Verwertung inhomogener heizwertreicher Abfälle. Die Pyrolyse liefert Heizgas und koksähnliche Feststoffe, die den Anforderungen an Ersatz- und Zusatzbrennstoffe hinsichtlich gleichbleibender Qualität und Zusammensetzung genügen.

Die **Hydrolyse** und Alkoholyse sind ausschließlich für Polykondensate und Polyaddukte geeignete Verfahren. Durch gezielte Einwirkung von Wasser oder Alkoholen gelingt eine Rückgewinnung der für ihren Aufbau eingesetzten Monomere.

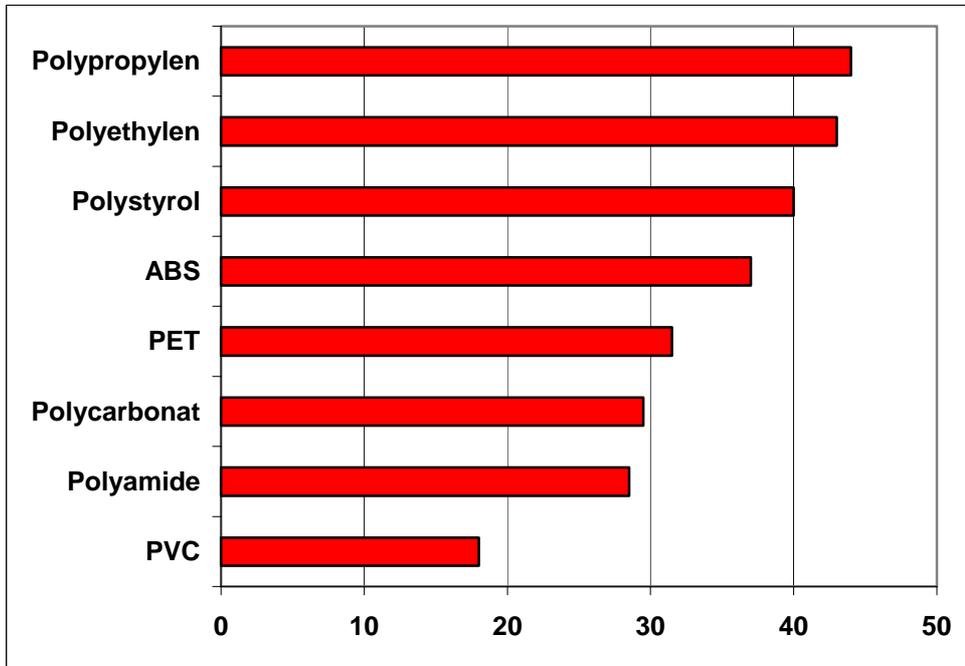
Die Hydrolyse bzw. Alkoholyse sind durch sehr hohe Anlagenkosten gekennzeichnet und erfordern entsprechend hohe Durchsatzmengen. Zusätzlich werden an das Einsatzmaterial sehr hohe Anforderungen hinsichtlich Sortenreinheit und Sauberkeit gestellt, was eine recht sorgfältige Vorbehandlung bedingt. So verursacht etwa bei der Hydrolyse von PET ein Verunreinigungsgrad von <0,5 % durch PVC (PVC kommt mit Ausnahme von Österreich als Flaschenmaterial zum Einsatz), bereits erhebliche Schwierigkeiten. Die Entfernung von Farbstoffen erfordert zusätzliche Reinigungsschritte.

Praktische Erfahrung mit der Hydrolyse bzw. Alkoholyse liegen für PET, Polyurethane und Polyamide vor. In den USA wird die Hydrolyse von PET aus dem Verpackungsbereich seit ungefähr 10 Jahren in größerem Umfang erfolgreich praktiziert.

III.4 Thermische Verwertung

III.4.1 Allgemeines

Die thermische Verwertung von Kunststoffabfällen hat die Nutzung ihres vergleichsweise hohen Heizwertes zum Ziel, der je nach chemischer Zusammensetzung zwischen 42 und 18 MJ liegt.



III-7: Heizwerte verschiedener Kunststoffe

Für den Einsatz in Rostfeuerungen sind Kunststoffe als alleiniger Brennstoff aufgrund ihres spezifischen Verbrennungsverhaltens ungeeignet und der mögliche Kunststoffanteil im Einsatzgut für Rostfeuerungen ist begrenzt. Die Bedingungen einer Wirbelschichtverbrennung kommen den Brennstoffeigenschaften von Kunststoffen grundsätzlich entgegen, es ist jedoch eine Aufbereitung und Vorbehandlung erforderlich. Keine besondere Aufbereitung erfordert der Einsatz im Drehrohrofen, hier sind auch vergleichsweise große Kunststoffteile ohne vorherige Zerkleinerung einsetzbar.

A
b
b
.

III.4.2 Verfahren und Beispiele

- Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen, mit angeschlossener Nutzung der Verbrennungswärme.
- (Mit)Verbrennung in industriellen Feuerungsanlagen in der Rolle eines Zusatz- bzw. Ersatzbrennstoffes.
- Pyrolyse/Vergasung mit anschließender Verbrennung der gewonnenen Konversionsprodukte und Nutzung der Verbrennungswärme.

Die Verbrennung von Kunststoffen als Bestandteil gemischter Abfallströme in Abfallverbrennungsanlagen stellt, sofern die erzeugte Verbrennungsenergie genutzt wird, eine verbreitet angewandte Form der thermischen Nutzung von Kunststoffabfällen dar. Trotz Ausbau der getrennten Erfassung spezifischer Abfallströme ist durch die generell steigende Verwendung von Kunststoffen eine Zunahme des Kunststoffanteils im Haus- bzw. Restmüll zu erwarten. Die Frage, inwieweit eine Erhöhung des Kunststoffanteils im Einsatzgut von Hausmüllverbrennungsanlagen den Anlagenbetrieb, die Menge und Qualität der Reststoffe und die Emissionen beeinflusst, war daher auch Gegenstand verschiedener Untersuchungen.

Grundsätzlich sind im Zusammenhang mit einer Erhöhung des Kunststoffanteils folgende Auswirkungen zu beachten:

- Erhöhung des Heizwertes des Einsatzstoffes
- Änderungen bei Verbrennungsluft- und Abgasmenge
- Organische Schadstoffe im Rohgas
- Schwermetalle im Einsatzstoff und in den Reststoffen (Asche, Filterstäube)

Beim Einsatz von Kunststofffraktionen, die halogenhaltige Kunststoffe enthalten, wie z.B. PVC, Teflon® und andere Fluorkunststoffe, chlorierte Kautschukarten sowie Kunststoffe mit halogenhaltigen Additiven (Flammschutzmittel), ist mit einer Erhöhung des Halogenanteils im Einsatzstoff und einer Erhöhung der Halogenwasserstoffe im Abgas zu rechnen.

Beispielhaft für die im Zusammenhang mit dieser Thematik durchgeführten Praxisversuche sollen hier die Ergebnisse zweier in Deutschland durchgeführten Versuchsreihen in einer technischen Versuchsanlage und einer kommunalen Hausmüllverbrennungsanlage (beide Rostfeuerungen) behandelt werden (39).

Durch gezielte Zugabe von Sortierresten aus der Verpackungssammlung wurde der Kunststoffanteil im Einsatzgut um 100% erhöht (von derzeit aktuellen 10-15% auf 30%).

V Versuchsergebnisse:

Eine Heizwerterhöhung erfordert Anpassungen im Betrieb der Anlage, wie Änderungen in der Verbrennungsluftführung, der Rostgeschwindigkeit oder der -beschickung. Das Ausmaß ist anlagenspezifisch, ebenso wie die Grenzen der verkraftbaren Heizwerterhöhung des Einsatzstoffes.

Deutliche Auswirkungen zeigte der Kunststoffanteil (10 % PVC Anteil im zugesetzten Kunststoff) auf den Halogengehalt des Mülls, im speziellen den Chlorgehalt, und in der Folge auf den Halogenwasserstoffgehalt des Rohgases. Die Emissionswerte im Reingas wurden nicht nachteilig beeinflusst.

Die Konzentration von Dioxinen und Furanen im Rohgas wurden durch den erhöhten Kunststoffanteil - trotz erhöhtem HCl-Gehalt im Reingas - nicht beeinflusst. Der Befund bestätigt die wesentliche Rolle, die der richtigen Dimensionierung des Feuerraumes und der richtigen Feuerungsführung zukommt.

Der Einfluss der Kunststoffe auf den Schwermetallgehalt des Ausgangsstoffes war in Summe unbedeutend, da der Gesamtschwermetallgehalt der zugesetzten Verpackungskunststoffe mit 2mg/kg im Vergleich zum Restmüll mit bis zu 8 mg/kg gering war. Selbst bei einzelnen Schwermetallen, die in Kunststoffen in höheren Konzentrationen zu erwarten sind, wie Cadmium, Kupfer und Antimon konnten keine signifikanten Abweichungen vom „Normalbetrieb“ mit Hausmüll festgestellt werden. Die Abweichungen lagen im Bereich der einsatzbedingten Schwankungen im Normalbetrieb.

Auf die Versuchsergebnisse über den Einfluss der Zugabe von Kunststoffen aus Elektro-/Elektronikgeräten auf die Verbrennung von Hausmüll bzw. Restmüll wird unter IV.1.3 genauer eingegangen.

Der Verwendung von Altkunststoffen als Zusatz- und Ersatzbrennstoff in **industriellen Feuerungsanlagen** hat im Zusammenhang mit der Frage nach Alternativen für die Verwertung stofflich nicht verwertbarer Kunststoffverpackungen stark an Bedeutung gewonnen.

Während die rohstoffliche Verwertung in Deutschland intensiv erprobt und untersucht wird, ist es in Österreich die industrielle (Mit)Verbrennung.

Um als Ersatzbrennstoff tauglich zu sein, müssen Kunststoffabfälle allerdings definierten Anforderungen hinsichtlich Heizwert, Lagerfähigkeit, Stückigkeit, Dosierbarkeit, Asche- und Feuchtigkeitsgehalt, Halogen-, Schwefel-, Schwermetallgehalt usw. entsprechen.

Die jeweils notwendige Qualität wird von der Art der Feuerungsanlage, vom Produktionsprozess und von den vorhandenen Anlagen zur Abgasreinigung und Reststoffbehandlung bestimmt. Die Anforderungen sind so zu definieren, dass weder die Emissionssituation noch das Produkt durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen nachteilig beeinflusst werden. Dies ist umso bedeutender, da industrielle Anlagen in der Regel nicht über die für Abfallverbrennungsanlagen üblichen Abgasreinigungsanlagen verfügen.

In der Praxis kommen Kunststoffabfälle derzeit v.a. in der Zementproduktion als Ersatzbrennstoff zum Einsatz. Aus den nach dem Aussortieren der stofflich verwertbaren Fraktionen aus den gesammelten Kunststoffverpackungen verbleibenden Mischkunststoffen lässt sich ein für Zementwerke geeigneter Brennstoff herstellen. Die Kunststoffe werden in zerkleinerter Form mit einer Korngröße von <10 mm primärseitig parallel zum jeweiligen Hauptbrennstoff in das Drehrohr eingespeist. Das dafür erforderliche Eintragsystem wurde in den Zementwerken entwickelt.

Qualitätsanforderungen an die einsetzbaren Kunststoffe sind in Tabelle III-2 beispielhaft für ein österreichisches Zementwerk wiedergegeben. Es handelt sich dabei um laut Genehmigungsbescheid maximal zulässige „Schadstoffgehalte“ (angegeben als Monatsmittelwerte) des Zusatzbrennstoffes, im praktischen Betrieb liegen die individuellen Qualitätsanforderungen der Zementwerke höher.

Tabelle III-2: Anforderungen an Kunststoffe für den Einsatz in einem Zementwerk
(Maximalwerte angegeben als Monatsmittelwert)

Parameter	Anforderung
Heizwert	> 23 MJ/kg
Feuchte	< 10 %
Gesamtchlorgehalt	< 2 Masse %
Blei	< 500 mg/kg
Cadmium	< 50 mg/kg
Chrom	< 300 mg/kg
Quecksilber	< 5 mg/kg

Quelle: Wietersdorfer Zementwerk

Die nach dem Prinzip einer zirkulierenden Wirbelschicht arbeitende Reststoffverwertungsanlage (RVL) in Lenzing setzt ebenfalls Abfallkunststoffe als Brennstoffe ein. Die Anlage ist derzeit die einzige industrielle Verbrennungsanlage, die den Anforderungen der Luftreinhalteverordnung für Kesselanlagen entspricht und daher für alle Luftschadstoffe die Emissionsgrenzwerte für Müllverbrennungsanlagen einhält.

Neben Kunststoffabfällen werden in der RVL Reste aus der Zelluloseproduktion, Klärschlämme, Rechengut, Siebüberläufe, Rinden und Altholz eingesetzt. Die auf dem Gelände der Lenzing AG betriebene RVL deckt den gesamten Strom- und Dampfbedarf des Produktionsstandortes der Lenzing AG und befindet sich noch im Probebetrieb. Die Qualitätsanforderungen an die Mischkunststofffraktion sind in Tabelle III-3 wiedergegeben.

Tabelle III-3: Beispiele für die Anforderungen an Kunststoffe für den Einsatz in einer industriellen Verbrennungsanlage

Parameter	Anforderung
Heizwert	6,5 –30 MJ/kg
Gesamtchlor	< 380 mg/MJ
Fluor	< 15mg/MJ
Schwefel	< 355 mg/MJ
Σ Blei, Zink, Chrom	< 230 mg/MJ
Σ Cadmium, Titan	< 0,5 mg/MJ

Σ Arsen, Kobalt, Nickel, Kupfer, Mangan, Antimon, Vanadium, Zinn	< 13 mg/MJ
Quecksilber	< 0,3 mg/MJ

Quelle: RVL Lenzing

IV. VERWERTUNG VON KUNSTSTOFFEN AUS EAG

IV.1 Stoffliche Verwertung

Eine stoffliche Verwertung von Kunststofffraktionen aus dem Bereich der EAG ist ungleich schwieriger zu realisieren als im Verpackungsbereich. Die Ursachen dafür sind hinlänglich bekannt:

- Komplexer Aufbau von EAG
- Viele Kleinteile
- Schwer trennbare Verbundkonstruktionen (Metall/Kunststoff)
- Vielzahl verschiedener Kunststoffe in einem Gerät
- Keine oder häufig auch falsche Kennzeichnung der Materialien
- Kritische Additive (Halogene, Schwermetalle)
- Fehlende praxistaugliche Sortieranlagen für Kunststoffgemische
- Hohe Qualitätsansprüche an Recyclate aus technischen Kunststoffen
- Geringe Massenströme der einzelnen Kunststoffsorten
- Fehlende Koordination von Kunststoffverwertern, Verarbeitern und Anwendern von Recyclaten.

Eine stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG findet daher sowohl in Österreich als auch im benachbarten Ausland nur in geringem Ausmaß statt. Im Regelfall werden die bei der mechanischen Aufarbeitung von EAG in diversen Reststofffraktionen anfallenden Kunststoffe je nach regionaler abfallwirtschaftlicher Praxis entweder deponiert oder in Abfallverbrennungsanlagen genutzt. Lediglich in Einzelfällen und unter günstigen Rahmenbedingungen wie z.B. bei Anlieferung größerer Chargen einheitlicher Geräte bekannter Zusammensetzung findet eine gezielte Demontage von Kunststoffteilen statt, die nach Sortierung und Zerkleinerung als Mahlgut auf dem Sekundärmarkt abgesetzt werden können.

IV.1.1 Kritische Additive

Ein besonderes Problem im Zusammenhang mit Kunststoffen aus EAG ist ihr möglicher Gehalt an organischen Halogenverbindungen in Form von Flammschutzmitteln sowie ihr möglicher Gehalt an Schwermetallen wie z.B. Cadmium, Blei, Kupfer, Zink usw. aus Pigmenten und Antimon, das als Synergist zu bromhaltigen Flammschutzmitteln eingesetzt wird. Diese Zusätze sind im Zusammenhang mit einer Verwertung kritisch zu sehen.

IV.1.1.1 Flammschutzmittel

Für verschiedene Geräte bzw. Geräteteile sind die aus Gründen der Produktsicherheit vorgeschriebenen Brandeigenschaften oft nur unter Verwendung flammhemmend ausgerüsteter Kunststoffe erfüllbar. Zu den Haupteinsatzgebieten für flammgeschützte Kunststoffe zählen Fernsehgeräte, Geräte der EDV und Bürotechnik sowie „innere“ Bauteile wie Leiterplatten, Steckverbindungen, Fassungen u.ä.

Für die Flammfestausrüstung von Kunststoffen stehen verschiedene Additive zur Verfügung, die sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und in ihrem Wirkungsmechanismus unterscheiden. Sie können physikalisch und/oder chemisch und dabei sowohl in der Fest-, in der Flüssig- oder in der Gasphase wirken.

Nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheidet man:

- Bromhaltige Flammschutzmittel
- Chlorhaltige Flammschutzmittel
- Phosphorhaltige Flammschutzmittel
- Stickstoffhaltige Flammschutzmittel
- Anorganische Flammschutzmittel

Tabelle IV-1: Weltweiter Verbrauch an Flammschutzmitteln (Basis 1996)

Basis	Europa	N-Amerika	Asien	Rest	Gesamt	Jährliches Wachstum
Brom (t)	53.000	67.000	97.000	7.000	224.000	6%
Chlor (t)	16.000	16.000	11.000	2.000	45.000	1%
Antimon (t)	18.000	20.000	35.000	2.000	75.000	3%
Aluminium-	90.000	150.000	75.000	10.000	325.000	5%

hydroxid (t)						
Phosphor (t)	65.000	48.000	30.000	5.000	148.000	4%
Andere (t)	15.000	13.000	7.000	gering	35.000	7%
Summe (t)	257.000	314.000	255.000	26.000	852.000	5%

Quelle: „Chemical Additives in Plastics“, Townsend Tarnell Inc., Mount Olive, NJ/USA; Kunststoffe 7/99, p.98

Die Wahl des Flammenschutzmittels wird vom Einsatzbereich, den Anforderungen bezüglich Brandwiderstand und vom verwendeten Kunststoff bestimmt. Mit einem Weltmarktanteil von fast 40% stellen bromierte Verbindungen die wichtigsten Flammenschutzmittel dar. Dies ist auf ihre hohe Wirksamkeit und ihr sehr gutes Preis/Leistungsverhältnis zurückzuführen.

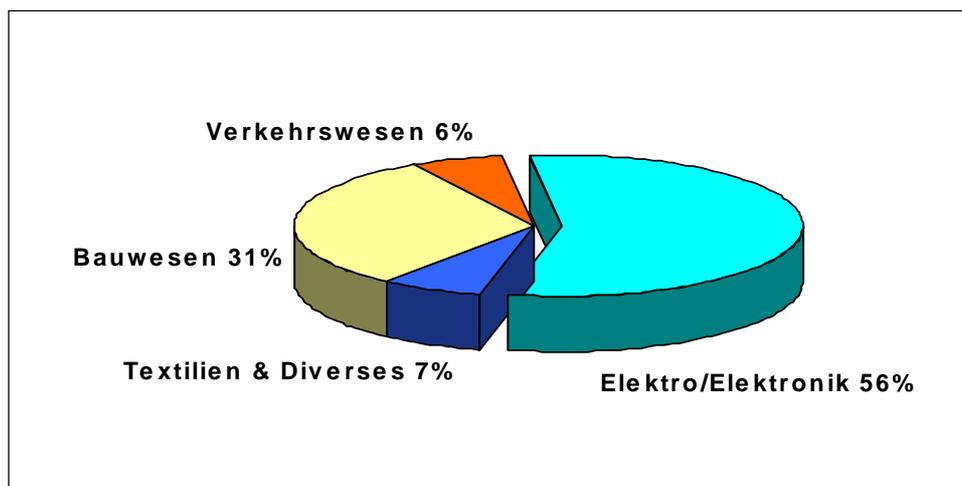


Abb. IV-1: Anwendungsbereiche für bromierte Flammenschutzmittel, Quelle:BSFE (5)

Als Flammenschutzmittel kommen folgende Bromverbindungen zum Einsatz:

- Tetrabrombisphenol A TBBPA
 - Hexabromcyclododecan HBCD
 - Decabromdiphenylether Deca-BDE
 - Octabromdiphenylether Octa-BDE
 - Pentabromdiphenylether Penta-BDE
 - Polybromierte Biphenyle PBB
- } Polybromierte Diphenylether PBDE

Tabelle IV-2: Weltweiter Verbrauch von bromierten Flammenschutzmitteln (1999)

	Europa	Amerika	Asien	Gesamt
TBBA (t)	13.800	21.600	85.900	121.300
HBCD (t)	8.900	3.100	3.900	15.900
Deca-BDE (t)	7.500	24.300	23.000	54.800
Octa-BDE (t)	450	1.375	2.000	3.825
Penta-BDE (t)	210	8.290	----	8.500
Summe (t)	30.860	58.665	114.800	204.325
Anteil	15%	29%	56%	100%

Quelle: BSEF (5)

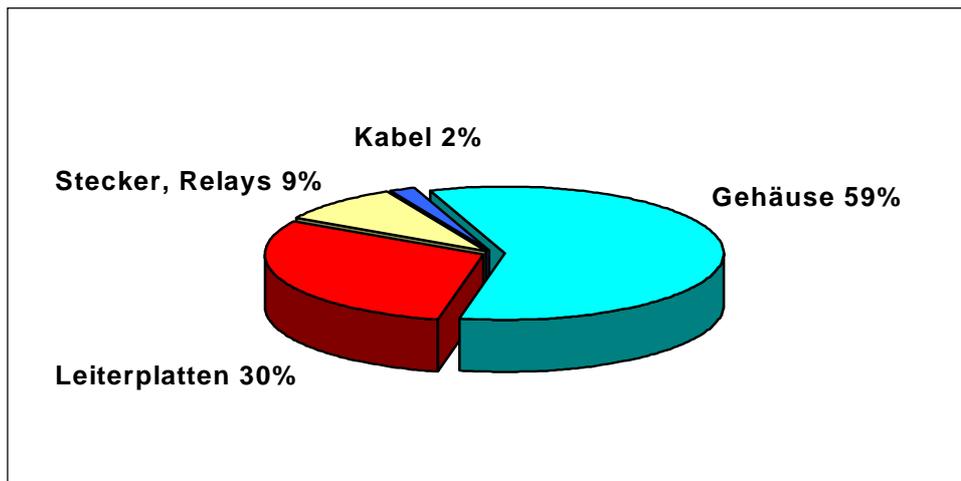


Abb. IV-2: Einsatz von bromierten Flammschutzmitteln im Bereich E & E, Quelle: BSFE (5)

Mehr als die Hälfte der eingesetzten bromierten Flammschutzmittel entfällt auf TBBA, das z.B. in nahezu allen Leiterplatten enthalten ist. In Gehäusekunststoffen kommen neben TBBA auch noch PBDEs zum Einsatz.

Tabelle IV-3: Einsatz von Flammschutzmitteln im E & E Bereich in Europa (1999)

Fernsehgeräte	Verwendete Flammschutzmittel	Mengen (t)
Rückwände	DBDFE, TBBPA	2.400
	Antimontrioxid	800
	Phosphate, Melamine	800
Leiterplatten	TBBPA	400
	Antimontrioxid	80
	andere (Phosphor, Magnesium- und Aluminiumhydroxid usw.)	20
Summe TV		4.500
EDV, Bürotechnik		
PC Monitore, PCs, Drucker, Fax, Kopierer usw.	Bromierte (TBBPA)	550
	Antimontrioxid	105
	Phosphatester	<75
	Aromatische Phosphorverb.	<75
Summe EDV		max. 800
Haushaltsgeräte		
Staubsauger, Kaffeemaschinen usw.:	Bromierte (TBBPA)	540
	Antimontrioxid	105
Bauteile wie Leiterplatten, Stecker, Fassungen (selten auch Gehäuse)	Andere (Phosphatester, roter Phosphor, chlorhaltige Verb., Magnesium-, Aluminiumhydroxid)	<100
Summe Haushalt		max. 700

Quelle: Risks & Benefits of the Use of Flame Retardants in Consumer Products; University Survey, 1/1999

Die Verwendung bromierter Flammschutzmittel ist umstritten und seit geraumer Zeit Gegenstand umweltpolitischer Diskussionen und zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen (5,15). Die Bedenken stehen einerseits im Zusammenhang mit direkt negativen Auswirkungen auf die Natur durch Bioakkumulation und andererseits im Zusammenhang mit der Bildung von Dioxinen und Furanen beim Erhitzen und in der Verbrennung. Auch ein hormonelles Aktivitätspotenzial wird z.B. für TBBPA und auch PBDEs nicht ausgeschlossen. Im Verdacht der Bioakkumulation stehen v.a. PBDEs, wobei für Penta-BDE ein derartiges Verhalten nachgewiesen ist. Die Dioxinbildung konnte sowohl für PBDEs als auch für TBBPA nachgewiesen werden.

Die Abschätzung der tatsächlich von bromierten Flammschutzmitteln verursachten Gefährdung für Mensch und Umwelt ist aufgrund der Komplexität der Wirkungen sehr schwierig. Die Sensibilität für diese Fragen ist in Europa besonders hoch und die Diskussion um den Ausstieg aus der Verwendung von PBDEs konzentriert sich derzeit auf Europa. Einige international tätige Hersteller von Fernsehgeräten sind daher inzwischen dazu übergegangen, in ihren Produkten für den europäischen Markt keine oder halogenfreie Flammschutzmittel einzusetzen. Ähnliche Tendenzen zeichnen sich auch im Bereich Bürotechnik ab.

Der Gehalt an bromierten Flammschutzmitteln ist im Zusammenhang mit der stofflichen Verwertung aus mehreren Gründen kritisch. Es besteht die Möglichkeit der Dioxinbildung während der Extrusion und damit die potenzielle Gefahr dioxinhaltige Recyclate zu produzieren. Werden flammgeschützte Kunststoffe gemeinsam mit nicht flammgeschützten Kunststoffen regranuliert, so kommt es durch die Verwendung derartiger Recyclate - auch wenn sie keine Dioxine enthalten - zu einem unerwünschten Eintrag kritischer Stoffe in Produktkreisläufe, in denen diese Stoffe bisher nicht zu finden waren und in denen ihre Funktion als Flammschwermetalle ev. gar nicht notwendig ist.

Für die Praxis des stofflichen Recyclings bedeutet das, dass es neben der Anforderung der Sortentrennung auch noch eine Unterscheidung in flammgeschützmittelhaltig und flammgeschützmitelfrei geben muss. In der abfallwirtschaftlichen Praxis kann dies derzeit nur aufgrund allgemeiner Erfahrung geschehen. Man weiß beispielsweise dass in Telefongehäusen, Staubsaugergehäusen, Gehäusen von Küchengeräten sowie großen Haushaltsgeräten in der Regel keine Flammschutzmittel enthalten sind, in Fernsehgehäusen und Gehäusen von EDV-Geräten vielfach schon.

Diese notwendige Maßnahme entzieht aber auch diejenigen Gehäuse, die keine bzw. alternative Flammschutzmittel erhalten, dem stofflichen Verwertungsweg, einen sehr sortenreinen Kunststoffstrom hochwertiger Materialien. Um hier eine gezielte Ausschleusung der Kunststoffe zu ermöglichen, die unerwünschte Additive erhalten, sind praxistaugliche (schnell, robust, bedienerfreundlich) Geräte zur Charakterisierung der Kunststoffe notwendig, die neben der Kunststoffsorte verschiedene Flammschutzkomponenten und auch Schwermetalle unterscheiden können. Existierende Geräte sind für den praktischen Einsatz in der Abfallwirtschaft noch nicht geeignet und die Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet sind sicher noch lange nicht abgeschlossen.

Der Lehrstuhl für Anorganische und Analytische Chemie der Universität Erlangen beschäftigt sich im Zusammenhang mit der Thematik des werkstofflichen Recyclings von flammgeschützten Kunststoffen mit der Entwicklung von Methoden zur raschen Identifizierung und Charakterisierung flammgeschützter Gehäusekunststoffe (29-31). In Tabelle IV-4 sind einige Ergebnisse dieser Arbeiten wiedergegeben.

Tabelle IV-4: Untersuchung von TV- und Monitorgehäusen auf Flammschutzmittel

Nr.	Kunststoff / Flammschutzmittel	Gesamtanteil (%) 228 Proben	Anteil Fernsehgehäuse (%) 111 Proben	Anteil PC-Monitore (%) 117 Proben
1	PS-HI / Deca-DPE	10,5	13,5	7,7
2	PS-HI / OBB*	4,4	9,9	0
3	PS-HI / HBDE	2,2	0,0	3,4
4	PS-HI ohne Flammschutz	17,5	28,8	6,8
5	ABS / TBBPA	8,8	0	17,1
6	ABS / TBBPA carbonatoligomer	0,9	0	1,7
7	ABS / Octa-DPE	11,8	16,2	7,7

8	ABS / TBPE**	8,3	1,8	14,5
9	ABS ohne Flammschutz	10,5	8,1	12,8
10	PPO-PS (inhärent flammwidrig)	15,4	7,2	23,1
11	Andere	9,6	14,4	5,1

* OBB = Octabrombiphenyl; ** TBPE= 1,2-Bis(tribromphenoxy)ethan

Die Probenfraktionen wurden am Bayrischen Landesamt für Umweltschutz auf ihren ursprünglichen Gehalt an bromierten Dioxinen und Furanen untersucht. In den Fraktionen 1, 7 und 8 lag die Dioxin/Furankonzentration über dem Grenzwert der deutschen Chemikalienverbotsverordnung, wodurch diese Materialien generell für ein stoffliches Recycling nicht mehr in Frage kommen. Ebenso sollten Kunststoffe die polybromierte Biphenyle enthalten (wie Fraktion 2) auf alle Fälle aus dem Produktkreislauf ausgeschleust werden.

Um die Relevanz der bromierten Flammschutzmittel hinsichtlich der Dioxinbildung beim stofflichen Recycling zu untersuchen, wurden die Fraktionen 3, 5 und 6 mehrmaligen aufeinanderfolgenden Extrusionen unterzogen. Die Ergebnisse für eine Probe der Fraktion 5 sind in Tabelle IV-5 angeführt.

Tabelle IV-5: Dioxin/Furankonzentration nach Mehrfachextrusion in TBBPA haltigem ABS

Extrusionen	0 µm/kg	1 µm/kg	2 µm/kg	3 µm/kg
2,3,7,8-Tetra-BDD	< 0,118	< 0,147	<0,430	<0,148
1,2,3,7,8 Penta-BDF	< 0,045	0,141	<0,111	<0,120
2,3,7,8-Tetra-BDF	< 0,059	0,175	<0,111	<0,060
2,3,4,7,8 Penta-BDF	<0,112	0,527	<0,111	<0,120
Summe 1*	0,334	0,999	0,763	0,448
1,2,3,4,7,8 Hexa-BDD	< 0,177	<0,323	<0,482	<0,534
1,2,3,6,7,8 Hexa-BDD				
1,2,3,7,8,9 Hexa-BDD	<0,177	<0,129	<0,482	<0,534
1,2,3,7,8 Penta-BDD	<0,291	<0,216	<0,851	<0,883
Summe 2*	0,979	1,658	2,578	2,399

Quelle: Inst. F. Anorg. u. Analyt. Chemie, Universität Erlangen; Bericht BayFORREST F 116 (30),

*Grenzwerte der deutschen Chemikalienverbotsverordnung

Summe 1: < 1µm/kg, Summe 2: < 5 µm/kg

Die Ergebnisse zeigen, dass in dem untersuchten Recyclat auch nach dreimaliger Extrusion die Grenzwerte der Chemikalienverordnung eingehalten wurden. Werkstofftests bescheinigten dem Material eine mit Neeware vergleichbare Einsetzbarkeit.

Tabelle IV-6: Werkstoffparameter Neeware/Recyclat

	E-Modul	Bruchdehnung
Neeware (Standardtypen)	2.400 – 2.500	3-3,5%
Recyclat	2335 N/mm ²	5,26 %

Quelle: Inst. F. Anorg. u. Analyt. Chemie, Universität Erlangen; BayFORREST Bericht F 116

IV.1.1.2 Schwermetalle

Neben den bromierten Flammschutzmitteln sind die in Kunststoffen in Form von Pigmenten und Stabilisatoren verwendeten Schwermetallverbindungen im Zusammenhang mit der Verwertung zu beachten. Das betrifft v.a. Cadmium und Blei: Die in der Vergangenheit häufig in Form von Rot- und Gelbpigmenten sowie als Thermostabilisatoren für PVC eingesetzten Cadmiumverbindungen dürfen heute nicht mehr verwendet werden und sollten daher auch nicht über Recyclingmaterial in Produktkreisläufen verbleiben, sondern ausgeschleust werden. Ähnliches gilt für Bleiverbindungen, die zunehmend nicht verwendet werden sollen und deren Einsatzverbot zumindest mittelfristig zu erwarten ist. Antimontrioxid wird als Synergist zu bromierten Flammschutzmitteln eingesetzt und wird gemeinsam mit diesen vom Recycling ferngehalten. Einen Überblick über die bei Analysen verschiedener Kunststoffgemische aus EAG gefundenen Schwermetallgehalte zeigen Tabelle IV-7 und Abb. IV-3.

:

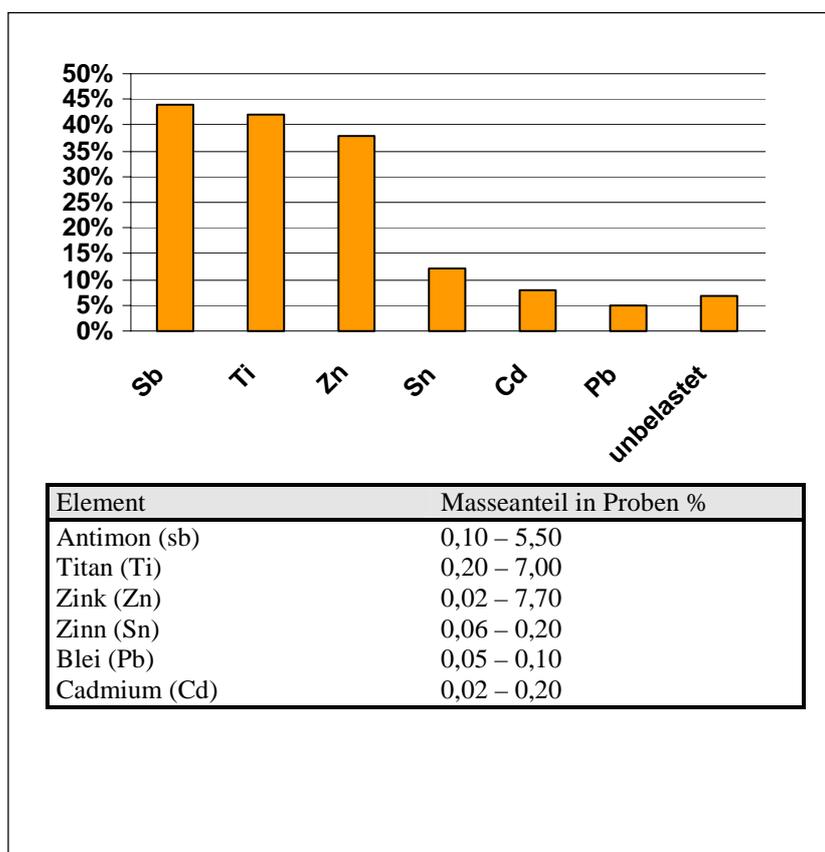


Abb. IV-3: Häufigkeit und

Konzentrationsbereiche für einige Schwermetalle in Kunststoffproben aus EAG, Quelle: (11)

Tabelle IV-7: Schwermetalle in verschiedenen Kunststoffgemischen aus EAG

Kunststoffe aus EAG				
Herkunft	Haushalt	Gewerbe	Industrie	Neugeräte
Zn (mg/kg)	620	1540	4720	292
Cu (mg/kg)	1900	82	77500	137
Cd (mg/kg)	240	123	29	41
Sn (mg/kg)	85	63	1230	18

Sb (mg/kg)	2000	1950	2200	2630
Pb (mg/kg)	146	96	1890	1890

Quelle: APME (6,7)

In der Praxis der stofflichen Verwertung erfolgt der Ausschluss von Kunststoffen mit kritischen Schwermetallgehalten ähnlich wie im Fall der Flammschutzmittel aus Erfahrung: Im Fall von Cadmium geschieht das in der Regel über die Elimination von roten, gelben und braunen Teilen. Antimon wird bei der Aussonderung flammgeschützter Teile miterfasst.

Um eine stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG zu forcieren, steht sowohl die Thematik der Identifizierung und Sortierung von technischen Kunststoffen als auch die Entwicklung neuer Möglichkeiten zur online Qualitätskontrolle von Recyclaten im Mittelpunkt zahlreicher wissenschaftlich/technischer Projekte (9-11,29-31). Viele dieser Projekt- und Forschungsergebnisse müssen noch in die abfallwirtschaftliche Praxis umgesetzt werden.

Die rege Forschungs- und Entwicklungstätigkeit zeigt den hohen Stellenwert, den das Thema im öffentlichen und gesellschaftlich/politischen Bewusstsein hat. Demgegenüber steht die Praxis der EAG-Verwertung, in der die stoffliche Verwertung von Kunststoffen die Ausnahme darstellt. Die ökonomisch schwierigen Randbedingungen, bedingt durch den Mangel an Hilfsmitteln für die effiziente Erkennung und Sortierung, den schwierigen Markt für Recyclate und die Konkurrenz durch die billige Deponierung sind einige der Ursachen. Ein wesentlicher Mangel ist auch im zu geringen Engagement der Kunststoffhersteller und -verarbeiter sowie der Anwender zu sehen.

IV.1.2 Praxis der stofflichen Verwertung

Die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG ist von Einzelinitiativen engagierter Unternehmen gekennzeichnet, die diesen Verwertungsweg in der Praxis umsetzen und weiterentwickeln. Damit verbunden sind Aktivitäten zur Entwicklung von Demontageanleitungen, Definition von Sortierkriterien, Anpassung und Optimierung von Trennverfahren, Festlegung von Qualitätskriterien und Erarbeitung von Qualitätssicherungsverfahren für Recyclate.

Im Rahmen dieser Aktivitäten kommt sehr deutlich zum Ausdruck, dass für eine erfolgreiche stoffliche Verwertung der Aufbau von Recyclingnetzwerken unter Zusammenarbeit folgender Partner notwendig ist:

- Gerätehersteller
- Demontage- und Aufarbeitungsunternehmen
- Recyclingunternehmen und Kunststoffproduzenten
- Verarbeiter des Recyclates
- Anwender des Recyclingproduktes.

Die aktive Beteiligung aller oben genannten Branchen stellt sicherlich einen Idealfall dar, die Zusammenarbeit von Demontage/Aufarbeitung, Recycler und Verarbeiter ist aber unumgänglich.

Den ersten entscheidenden Schritt im Hinblick auf die Bereitstellung von brauchbaren Materialströmen für eine stoffliche Kunststoffverwertung stellt die Definition des angestrebten Sekundärwerkstoffes dar. Dabei ist neben der Kunststoffsorte auch der geplante Anwendungsbereich für das gewonnene Recyclat in Betracht zu ziehen, woraus sich auch die wichtigsten zu erreichenden Materialkennwerte des Recyclates ergeben. Das Problem der Flammenschutzmittel und Schwermetalle wird durch den Ausschluss jener Geräte bzw. Geräteteile, die erfahrungsgemäß derartige Additive enthalten, gelöst. Im nächsten Schritt kann die Auswahl der EAG erfolgen, die als Quelle für den definierten Materialstrom in Frage kommen, wobei auch der bisherige Einsatzbereich und die damit verbundene Beanspruchung zu berücksichtigen sind. Die möglichen Materialquellen für ABS-Recyclat reichen z.B. von Telefonen über Staubsauger und Küchengeräte bis zu Tastaturen und Gehäusen von Geräten der Informations- und Bürotechnik. Für IT-Gehäuse kommen aber völlig anders additivierte ABS-Typen zum Einsatz als für Telefone oder Staubsauger. Die Beanspruchung eines Laugenbottichs oder einer Waschmaschinenverkleidung ist anders einzuschätzen als die eines Kaffeemaschinengehäuses – in beiden Fällen handelt es sich um spritzgegossenes Polypropylen. Zuletzt ist auch der für das Recyclat geplante Verarbeitungsprozess nicht ohne Bedeutung, da beispielsweise Recyclate, die aus spritzgegossenen Teilen gewonnen werden, nicht ohne weiteres für Extrusionsanwendungen einsetzbar sind.

Für die Behandlung und Aufarbeitung von EAG hat sich nicht nur in Österreich folgende grundsätzliche Vorgangsweise etabliert:

- Sortierung in Gerätegruppen bereits bei der Sammlung/Übernahme der EAG
- Vordemontage und Schadstoffentfrachtung
- Demontage
- Mechanische Aufarbeitung zur Gewinnung von Wertstoffen

Unter den Begriff Wertstoffe fallen neben den Metallen und Glas (Bildschirme) auch sortenreine Kunststoffe. Die im Bereich der EAG-Verwertung eingesetzten mechanischen Aufbereitungsanlagen sind heute für die Gewinnung möglichst reiner Metallfraktionen ausgelegt. Die Gewinnung von Kunststofffraktionen stellt noch die seltene Ausnahme dar. Unter der Voraussetzung einer gezielten Planung des Aufgabematerials eignet sich aber die mechanische Aufbereitung auch für die Gewinnung sortenreiner Kunststofffraktionen.

Die beiden nachfolgend im Detail behandelten Praxisbeispiele zur Gewinnung sortenreiner Fraktionen für die stoffliche Verwertung stehen auch exemplarisch für zwei verschiedene Verfahrensgrundsätze: die Anpassung und Ergänzung der aus der Aufbereitung von Metallgemischen bekannten Technologie für die Trennung von Kunststoffgemischen sowie die manuelle Demontage, Trennung und Sortierung als Vorstufen für die Anwendung der „klassischen“ Verwertungsrouten über die Regranulation.

IV.1.2.1 Sortenreines Mahlgut aus Haushaltskleingeräten

Firma:

ZME Elektronik Recycling GmbH

Ludwig Rinn-Straße 14-16

35452 Heuchelheim

Tel: ++49/641 682 89

Ansprechpartner: DI. Bernhard Jehle

Die ZME Elektronik Recycling GmbH in Heuchelheim (Hessen) beschäftigt sich seit 1993 mit der Behandlung, Verwertung und Entsorgung von EAG und Elektronikschrott. Neben einer Aufbereitung für Bildröhren verfügt das Unternehmen seit 1996 auch über eine Anlage zur Trennung von Kunststoff/Metallverbunden, die speziell für die Aufarbeitung von Haushaltskleingeräten, Geräten aus der Bürotechnik (z.B. Drucker) und Funktionsteilen aus Großgeräten ausgelegt ist. Sowohl die anfallenden Metalle als auch die Kunststoffe werden einem mechanischen Trennprozess unterzogen. Neben Kunststofffraktionen aus der EAG-Aufbereitung werden auch solche aus dem Automobilbereich verarbeitet wie z.B. Blink- und Heckleuchten, Stoßfänger, Kühlwasserausgleichsbehälter, Batteriekästen. Die Bereitstellung sortenreiner Kunststoffmahlgüter vornehmlich aus ABS und PP stellt die Besonderheit des Unternehmens dar. Bei Bedarf werden verschiedene sortenreiche Mahlgüter zur Einstellung der für eine vorgesehene Verarbeitung/Anwendung erforderlichen Materialkennwerte verschnitten. Die Mahlgüter werden an ausgewählte Verarbeiter vermarktet. Das Unternehmen beschäftigt derzeit 15 Mitarbeiter, davon sind 3 Personen im Bereich Kunststoffrecycling tätig.

Der Bereich Kunststoffrecycling stellt innerhalb der Geschäftstätigkeit der ZME Recycling GmbH eher noch ein „Hobby“ dar. Nach Einschätzung von Geschäfts- und Betriebsleitung befindet man sich aber an der Schwelle zum tatsächlichen Geschäftszweig.

Die Gewinnung der sortenreinen Kunststoffmahlgüter erfolgt bei ZME mit Hilfe mechanischen Sortier-, Klassier- und Trennprozesse. Produkte bzw. Geräte mit ähnlicher Bauart und Stoffzusammensetzung v.a. hinsichtlich der Kunststoffteile werden zu sogenannten „Verwertungsklassen“ zusammengefasst. Diese Vorbehandlung sorgt dafür, dass im Aufgabebereich für die mechanischen Anlagen die gewünschte Zielfraktion in ausreichendem Maße vorhanden ist.

Derzeit arbeitet ZME mit den Verwertungsklassen „**Kaffeemaschine**“ zur Gewinnung von PP-Mahlgut und „**Staubsauger**“ zur Gewinnung von ABS-Mahlgut.

Die prinzipielle Funktionsweise der Anlage beinhaltet als ersten Schritt eine Vordemontage bzw. Vorkonditionierung der Geräte durch Entfernen von Kabeln, Batterien und schadstoffhaltigen Bauteilen. In der darauf folgenden Trockenstrecke erfolgt die Trennung der Materialverbunde Metall/Kunststoff, die Zerkleinerung und die Sortierung der Materialien mit dem Ziel der Abtrennung vermarktbarer Metallfraktionen.

Die verbleibende Kunststofffraktion wird mit dem Ziel sortenreines Mahlgut herzustellen einer nassen Aufbereitung unterzogen: Das auf eine Korngröße von < 1 cm zerkleinerte Material durchläuft eine Friktionswäsche, eine Schwimm/Sinktrennung und eine Sortierung auf einem Nassstoßherd, eine mechanische und thermische Trocknung sowie eine Entstaubung. Das erhaltene Mahlgut erreicht eine Reinheit von bis zu 99%.

Die ZME Recycling GmbH war auch Projektpartner eines Verbundforschungsprojektes „**ProMeKreis**“ (Methoden zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Einfach- und Komplexgeräten unter Berücksichtigung der Recyclingkosten und unter Einbeziehung innovativer Verwertungstechniken bei der Produktentwicklung; gefördert vom Deutschen Ministerium für Bildung und Forschung). Die von der Firma ZME entwickelten Aufarbeitungsprozesse „Kaffeemaschine“ und „Staubsauger“ wurden im Rahmen der Projektarbeiten für die Untersuchung und Bewertung der Verwertbarkeit von Elektrogeräten eingesetzt, dokumentiert und mögliche Verbesserungen formuliert. Die folgenden Prozessbeschreibungen entstammen dem Ergebnisbericht des Projektes „**ProMeKreis**“ und wurden im Detail von Herrn DI. Stefan Rath von der TU in München ausgearbeitet.

Verwertungsprozess Kaffeemaschine (Firma ZME-Elektronik-Recycling)

Verwertungs-Ziel:

Das Hauptziel des Prozesses ist die Rückgewinnung einer sortenreinen Polypropylen-Fraktion. Metalle und metallhaltige Teile (Cu, Al, Fe) werden durch verschiedene Trennoperationen aus dem Prozess ausgeschleust und einem separaten Aufbereitungsprozess zur Metall-Rückgewinnung zugeführt.

Beschreibung des Prozessablaufes:

Das Aufgabegut wird zunächst (sofern nicht vom Zulieferer vorgenommen) in einem Konditionierungsschritt für den Prozess vorbereitet. In der Konditionierung werden allgemein folgende Bauteile entfernt:

- Stör- und Problembauteile
- Baugruppen zur Wieder-/Weiterverwendung
- Baugruppen, die besondere Wertstoffe enthalten
- Baugruppen, die in Spezialverfahren verwertet werden

Am Aufgabegut „Kaffeemaschine“ werden zum Beispiel die Glaskannen entfernt und das Zuleitungskabel abgeschnitten. Letzteres wird in einem speziellen Aufbereitungsprozess für Kabel verwertet. Stör- und Problembauteile für den Prozess stellen die in Tabelle IV-8 aufgeführten Bauteile dar.

Tabelle IV-8: Stör- und Problembauteile

Stoffgruppe	Beispiele
Stoffe mit Gefährdungspotenzial	<ul style="list-style-type: none"> • Asbesteinlagen • Quecksilberschalter • flüssige Chemikalienfüllungen • PCB- und Elektrolyt-Kondensatoren • Explosivstoffe
Stoffe mit Umweltgefährdungspotenzial	<ul style="list-style-type: none"> • Lithium-Batterien • Zink-Kohle-Batterien
Magnete (geringe Mengen zulässig)	<ul style="list-style-type: none"> • Telefone
Störstoffe für nasse Aufbereitungsverfahren (Ausnahme: Stoff liegt in einem Bauteil eingebunden vor, das nach der Prallmühle sortiergerecht ist)	<ul style="list-style-type: none"> • Öl- und Fettfüllungen • Stäube • in Wasser reaktive Stoffe

Anschließend wird das Aufgabegut zunächst in der Prallmühle in einem Vorzerkleinerungsschritt „aufgebrochen“, so dass die Funktionsbauteile einer Handsortierung zugänglich werden. In der folgenden Handsortierung werden Funktionsbauteile, die Wertstoffe enthalten, aber auch Stör- und Problemstoffe (z.B. Gummischläuche, Kondensatoren usw.) für nachfolgende Operationen entfernt. Es werden die in Tabelle IV-9 aufgelisteten Fraktionen gebildet.

Ferromagnetische Materialien werden nicht in der Handklaubung, sondern durch einen nachgeschalteten Überband-Magnetscheider ausgetragen. Dem Magnetscheider schließt sich eine Rotorschere an, in der das Gut auf eine durchschnittliche Partikelgröße von ca. 30 mm zerkleinert wird und Verbunde weiter aufgeschlossen werden.

Tabelle IV-9: Fraktionenbildung bei der Handklaubung

Fraktion	Inhalt (Beispiele)
Aluminium	Heizelement, Alu-Heizplatte (nach Möglichkeit ohne andere Metalle)
Kupferhaltige Fraktion	<ul style="list-style-type: none"> • Kupferheizplatten (nach Möglichkeit ohne andere Metalle, jedoch Kabelanhaftungen oder Schlauchstücke etc. kein Problem) • Drähte und Kabel (ggf. mit geringen Anhaftungen wie Zugentlastung und Schrauben, Stecker oder Schalter) • Evtl. auch kupferhaltige Kleinteile
wertstoffhaltige Elektronik	Platinenteile (ggf. mit Anhaftungen wie Drähte)
Stör- und Problemstoffe/-bauteile	Kondensatoren, Schläuche, Elastomere

Der Materialstrom wird anschließend in einem Doppel-Spannwellensieb in die Fraktionen < 5 mm, $5 < x < 25$ mm und > 25 mm klassiert. Da die Fraktion < 5 mm erfahrungsgemäß einen hohen Anteil an Problemstoffen enthält, die nicht hinreichend von der Kunststofffraktion getrennt werden können (feine Metallteile, zerkleinerte Platinenstücke), wird die Fraktion aus dem Prozess ausgeschleust. Die Fraktion > 25 mm wird erneut der Magnetscheidung und der Zerkleinerung in der Rotorschere zugeführt.

Das Mittelgut ($5 \text{ mm} < x < 25 \text{ mm}$) wird in einem Zickzack-Sichter von flugfähigem Leichtgut befreit und anschließend einem Luftherd zugeführt. Hier bilden sich drei Fraktionen: Schwergut, Mittelgut und Leichtgut.

Die Schwerfraktion enthält vor allem Metalle und Metall-Kunststoff-Verbunde, aber auch Kondensatoren, Glas, Keramik und größere Gummi-Teile. Sie werden aus dem Prozess ausgeschleust und getrennt weiter aufbereitet. In der Leichtfraktion werden eventuell noch Staub und Reste von Folien- und Papierstücken ausgetragen.

Der Produktstrom enthält nun hauptsächlich thermoplastische Kunststoffe. Um die Standzeit der nachfolgenden Schneidmühle nicht zu beeinträchtigen, läuft das Gut über einen weiteren Magnetscheider um eventuell noch enthaltene ferromagnetische Metalle und Metall-Kunststoffverbunde abzutrennen. Es werden hauptsächlich kleinere Metallteile erfasst, die im Luftherd nicht ausgetragen wurden. In der Schneidmühle wird das Kunststoff-Material auf eine Korngröße $x < 10$ mm zerkleinert. Dabei findet gleichzeitig eine Wäsche des Mahlgutes statt. Anschließend wird Feinstgut und Schlamm abgetrennt.

Die Trennung der Polypropylen-Fraktion von den übrigen Kunststoffen erfolgt durch Schwimm-Sink-Scheidung. Voraussetzung hierfür ist, dass die übrigen Materialien eine Dichte $\rho > 1000 \text{ kg/m}^3$ aufweisen. Das Polypropylen-Mahlgut wird anschließend mechanisch und thermisch getrocknet. Da Feinstmaterial bei direkter Weiterverarbeitung in einem Extruder überhitzt wird und so zu Betriebsstörungen führen kann, wird das Mahlgut vor dem Absacken in einer Entstaubung von Feinstmaterial befreit.

Einen Überblick über die Zusammensetzung der End-Fraktionen bei der Aufbereitung von Kaffeemaschinen gibt Abb. IV-4.

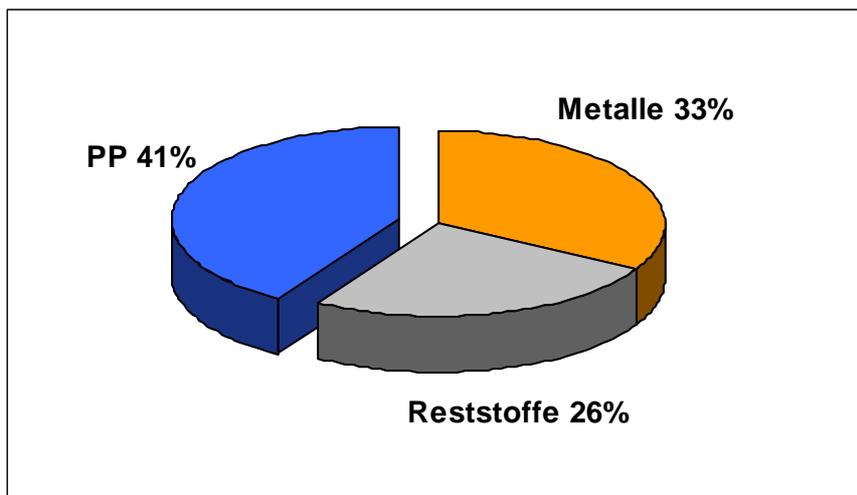


Abb. IV-4: Materialfraktionen aus dem Prozess „Kaffeemaschine“, Quelle: (3)

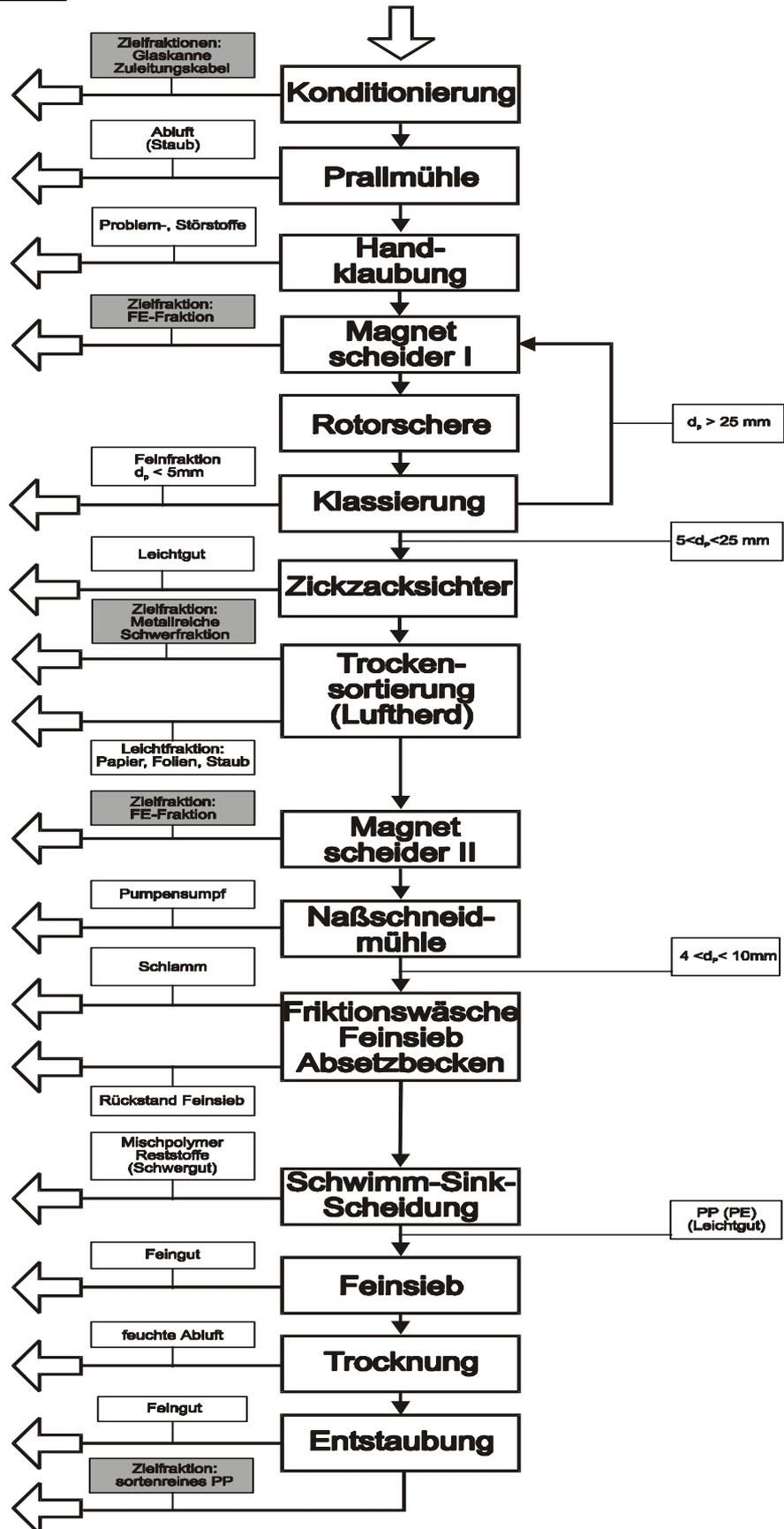
Auf die PP-Fraktion entfallen ca. 40 % des gesamten Endproduktes. Dieses Ergebnis belegt die Sinnhaftigkeit der Rückgewinnung von sortenreinen, vermarktbareren Kunststoff-Fraktionen aus ausgewählten EAG. Entsprechend der Idee zur Bildung von Verwertungsklassen können dem Prozess auch andere Geräte zugeführt werden, sofern sie die in Tabelle IV-10 aufgeführten Kriterien der Verwertungsklasse „Kaffeemaschine“ erfüllen.

Tabelle IV-10: Klassifizierungskriterien für die Verwertungsklasse „Kaffeemaschine“

Klasse	„Kaffeemaschine“ (ZME Prozess): Kleingeräte mit hohem PP-Anteil
Klassenkriterien	<p><u>Verwertungsziel:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Haupt-Nichtmetall-Werkstoff ist Polypropylen (Massenanteil PP > 40%) • Rückgewinnung metallischer Wertstoffe: Al, Cu und Fe (z.T. auch Elektronik-Bauteile) <p><u>Prozessanforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • keine Stoffe mit Gefährdungspotenzial • keine freisetzbaren Störstoffe für Nassverfahren <p><u>Funktionsanforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufgabegröße < 600*400*280 mm, nicht plattenförmig • keine metallischen Massiv- oder Kompaktbauteile > 50*50*50 mm • keine Materialien, die bei Zerkleinerung eine sehr hohe Staubbelastung hervorrufen • möglichst kein Werkstoff mit $\rho < 1 \text{ kg/l}$ außer PP • Gehäuse möglichst aus PP in einer Wandstärke von 0,5 bis 2 mm

Unter Berücksichtigung dieser Klassenkriterien können diesem Verwertungsprozess beispielsweise auch Kaffeeautomaten, Wasserkocher und Toaster zugeordnet werden.

Prozess-Fließbild:



Verwertungsprozess „Staubsauger“ (Firma ZME-Elektronik-Recycling)

Das Hauptziel des Prozesses ist in diesem Fall die Rückgewinnung einer sortenreinen ABS-Fraktion. Der Verwertungsprozess verläuft mit einigen Abwandlungen analog der Verwertungsklasse „Kaffeemaschine“. So werden etwa im Aufgabegut „Staubsauger“ als störende Teile die Staubbeutel, die Saugrüssel und die Saugschläuche entfernt, sowie die Zuleitungskabel abgeschnitten. Letztere werden in einem speziellen Aufbereitungsprozess für Kabel wiederverwertet.

Die Abtrennung der ABS-Fraktion von den übrigen Kunststoffen erfordert eine Änderung gegenüber dem Verfahren für PP. Sie erfolgt in zwei Schritten unter Ausnutzung der üblichen spezifischen Dichte von ABS, die zwischen 1000 kg/m^3 und 1100 kg/m^3 liegt.

- In einer Schwimm-Sink-Scheidung erfolgt die Trennung von Gut mit einer Dichte $\rho < 1000 \text{ kg/m}^3$.
- Das Schwergut aus der Schwimm-Sink-Scheidung wird in einem Nassstoßherd von Material mit einer Dichte $\rho > 1100 \text{ kg/m}^3$ abgetrennt. Voraussetzung für eine sortenreine ABS-Fraktion ist dabei, dass die Dichte aller enthaltenen Nicht-ABS-Werkstoffe nicht im Dichtebereich von ABS liegt, sondern sich vielmehr möglichst deutlich davon unterscheidet.

Das ABS-Mahlgut wird anschließend mechanisch und thermisch getrocknet und aus den bereits beschriebenen Gründen vor dem Absacken in einer Entstaubung von Feinstmaterial befreit.

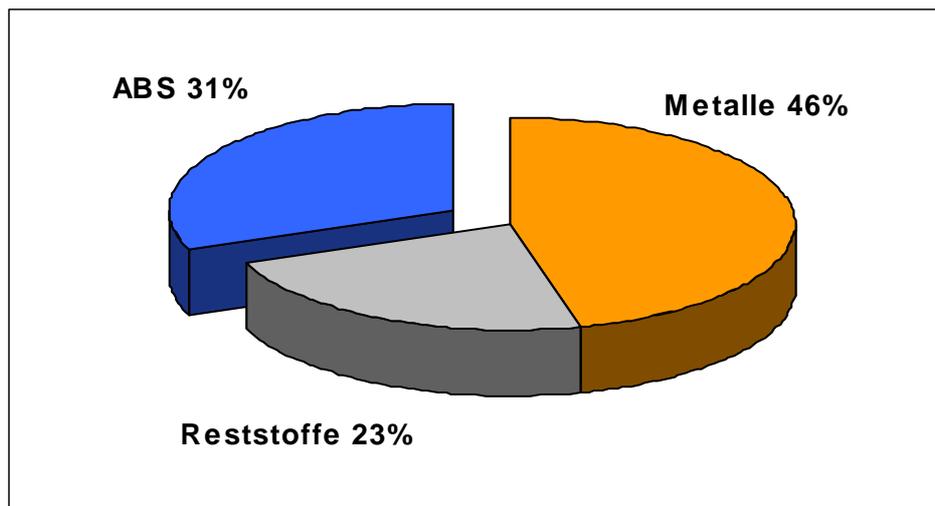
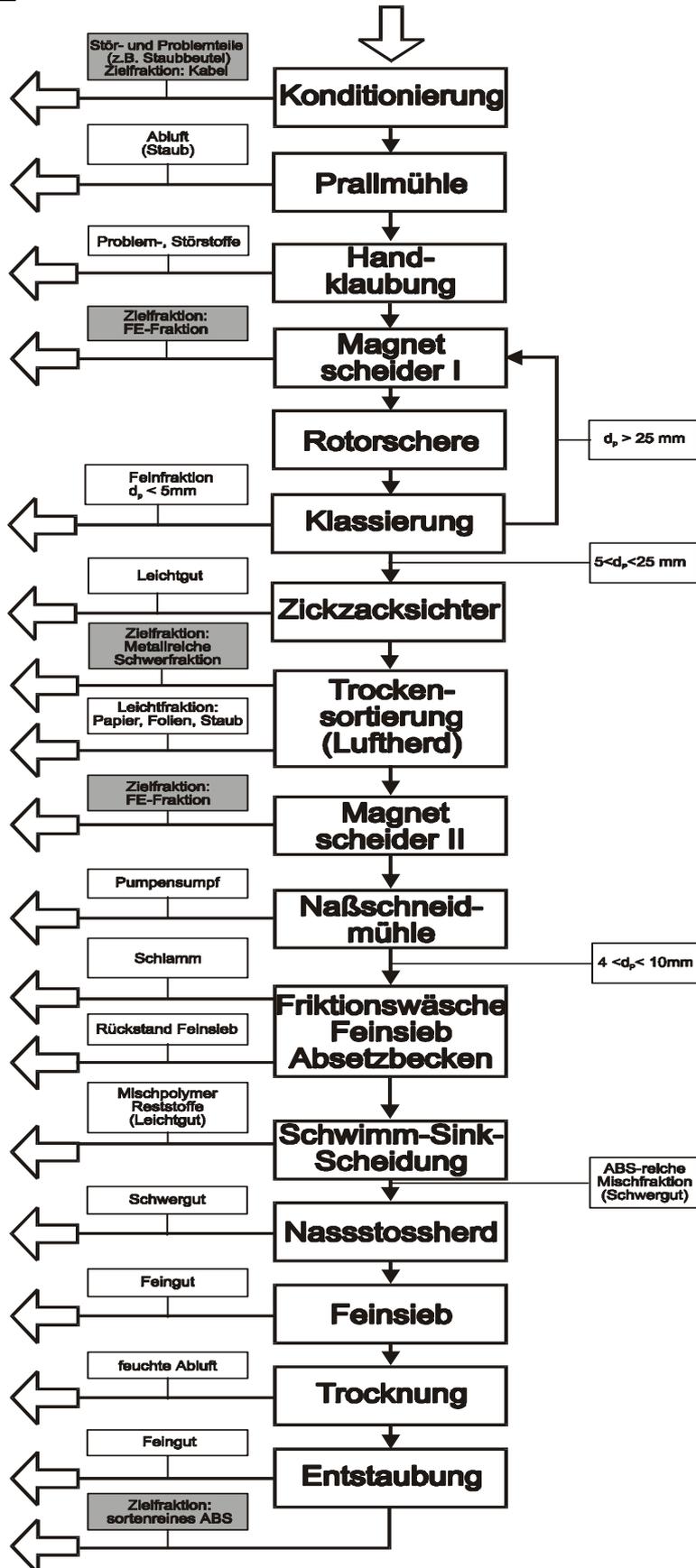


Abb. IV-5: End-Fractionen bei der Aufbereitung von „Staubsaugern“, Quelle: (3)

Prozess-Fließbild:



Entsprechend der Idee zur Bildung von Verwertungsklassen können dem Prozess auch andere Geräte zugeführt werden, sofern sie die in Tabelle IV-11 aufgeführten Kriterien der Verwertungsklasse „Staubsauger“ erfüllen.

Tabelle IV-11: Klassifizierungskriterien der Verwertungsklasse „Staubsauger“ der Fa. ZME

Klasse	„Staubsauger“ (ZME Prozess) Geräte mit hohem ABS-Anteil
Klassenkriterien	<p><u>Verwertungsziel:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Haupt-Nichtmetall-Werkstoff ist ABS (Massenanteil ABS > 40 %) • Rückgewinnung metallischer Wertstoffe: Al, Cu und Fe (z.T. auch Elektronik-Bauteile) <p><u>übergeordnete Prozessanforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • keine Stoffe mit Gefährdungspotenzial • keine freisetzbaren Störstoffe für Nassverfahren <p><u>Funktionsanforderungen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufgabegutgröße < 600*400*280 mm, nicht plattenförmig (Dicke > 60 mm) • keine metallischen Massiv- oder Kompaktbauteile > 120*120*120 mm • keine Materialien, die bei Zerkleinerung eine sehr hohe Staubbelastung hervorrufen • kein Werkstoff außer ABS, der nicht schwimmfähig (< 1,0 kg/dm³) ist oder dessen Dichte nicht um mindestens 0,5 kg/dm³ diejenige von ABS überschreitet • Gehäuse möglichst aus ABS in einer Wandstärke zwischen 0,5 und 2 mm

Unter Berücksichtigung dieser Klassenkriterien können diesem Verwertungsprozess z.B. folgende Geräte zugeführt werden:

- Bodenstaubsauger
- Allroundsauger
- Regelanlagen von modernen Heizungen
- Tintenstrahldrucker

Die Aufbereitungsverfahren befinden sich naturgemäß in einer ständigen technischen Entwicklungs- und Optimierungsphase. So wird derzeit der Einsatz von Hydrozentrifugen und hydraulischen Stoßherden als mögliche Alternative bzw. zusätzlicher Trennschritt zur Schwimm/Sinktrennung untersucht, bei der sich immer wieder Schwierigkeiten ergeben. Während bei der Trennung von ABS dichtegeleiche Fremdkunststoffe wie etwa gefülltes PP oder ABS/PC-Blends für Verunreinigungen in der ABS-Fraktion verantwortlich sind, sind es im Fall von PP schwimmende Fremdstoffe wie z.B. Holz, Papier usw.

Das Prinzip der Verwertungsklassen hat sich grundsätzlich bewährt. In Planung bzw. Erarbeitung befinden sich die Klasse „Druckergehäuse“ für ABS-Mahlgut bzw. ABS/PC-Mahlgut.

Die Kapazität der Anlage erlaubt einen stündlichen Durchsatz von 3-4 t in der Trockenstrecke. Die jährliche Verarbeitungskapazität liegt unter der Annahme von ca. 1800 Produktionsstunden/a bei ca. 6.300 Tonnen. Im Hinblick auf die Gewinnung der Kunststoffmahlgüter ist die Kapazität der Nassstrecke und der Kunststoffgehalt der aufgegebenen Geräte relevant. Aus einer Tonne Staubsaugern lassen sich rund 300 kg ABS Mahlgut gewinnen, aus einer Tonne Kaffeemaschinen etwa 400 kg PP-Mahlgut. Bei der Aufarbeitung von Staubsaugern gelangen etwa 50% des ursprünglichen Gerätegewichtes in die Nassaufbereitung, bei Kaffeemaschinen jedoch mehr als 60%.

Die reinen Aufarbeitungskosten liegen je nach Gerätegruppe bei 0,4 bis 0,5 DM/kg (€ 0,2-0,25/kg). Die Erlöse für das gewonnene Mahlgut bewegen sich für ABS derzeit bei 0,8 –0,85 DM/kg (€0,4-43/kg).

IV.1.2.2 Sortenreines Polystyrolmahlgut aus Kühlgeräten

Firma

SEG Umweltservice GmbH

Auf der Haardt 2

D 66693 Mettlach

Die Fa. SEG hat im Zusammenhang mit der Verwertung und Entsorgung von Kühlgeräten auch ein Verfahren zur Gewinnung von sortenreinem PS-Mahlgut. Ausgangsmaterial für die Aufarbeitung ist jene Metall/Kunststoff Mischfraktion, die nach dem Shreddern der schadstoffentfrachteten Gehäuse anfällt und aus der bereits der überwiegende Teil der Eisenmetalle entfernt wurde. Das Gemisch weist im Durchschnitt etwa folgende Zusammensetzung auf:

55% Kunststoffe, 30 % Kupfer /Aluminium, 13% Eisen/Stahl, 0,5 % PUR, 1,5 % Reststoffe

Da für die „Innenausstattung“ von Kühlgeräten nahezu ausnahmslos Polystyrol zum Einsatz kommt; sind die Voraussetzungen für eine Abtrennung der Kunststoffe im Sinne einer „Verwertungsklasse“ nahezu ideal. Das aus der Gehäusezerkleinerung angelieferte Mischgut wird in folgenden Teilschritten aufgetrennt: Nach einer Entfernung unerwünschter Bestandteile > 50 mm über eine Siebtrommel, erfolgt die Abscheidung von Eisen- und Stahlteilen durch einen Überbandmagnet (Abscheidgrad 90%). Die verbleibende Mischfraktion wird durch Wirbelstromscheidung in drei Materialströme aufgeteilt: eine NE-Metallfraktion, die Aluminium und Kupfer enthält, eine Fraktion in der sich alle restlichen Eisen- und Stahlteile befinden und eine Restfraktion in der sich Kunststoffe und Reststoffe befinden. Die Metallfraktionen stellen vermarktbar Wertstofffraktionen dar und werden aus dem Prozess ausgeschleust. Die Kunststofffraktion wird weiter aufgetrennt. Durch Windsichtung erfolgt der Austrag von PUR Flocken und mit Hilfe einer Schwimm/Sinktrennung in Kombination mit einem Hydrozyklon erfolgt eine Abtrennung des Polystyrols, das nach einer Trocknung als Mahlgut mit einer Reinheit von ca. 98% anfällt. Das Mahlgut wird an Regranulierbetriebe weitergegeben, wo eine Erhöhung der Reinheit auf >99,8% erfolgt. Zum Teil lässt sich das Mahlgut auch direkt absetzen und wird für weniger anspruchsvolle Produkte eingesetzt. Bezogen auf das Inputmaterial liegt der Anteil des abtrennbaren Polystyrols bei 35-40%.

Die Gesamtkosten für die Auftrennung liegen bei DM 1,5/kg (€0,76/kg) inklusive anteilige Investitions- und Betriebskosten. Die Nachfrage nach dem Mahlgut ist gemäß Aussage der Fa. SEG sehr hoch. Die erzielbaren Erlöse für das Mahlgut liegen bei DM 0,6-0,8/kg (€0,3-0,5).

IV.1.2.3 Firma: ABS-Regranulat für Herstellung von TV-Gehäusen Sysplast®

GRUNDIG AG
Ökotechnologie Zentrum
Nürnberg
Tel.: ++49/911/703 2400
Ansprechpartner: DI. Horst Biegel

Die Firma GRUNDIG hat einen anderen Zugang zu EAG und geht technologisch einen etwas anderen Weg um sortenreine Kunststoffströme für die Verwertung zu erhalten.

Die Firma GRUNDIG in Nürnberg stellt die Kunststoffgehäuse für die von ihr produzierten Geräte der Unterhaltungselektronik selbst her. Die bei der Gehäuseherstellung anfallenden Verarbeitungsabfälle und Ausschussprodukte wurden - wie in jedem kunststoffverarbeitendem Betrieb aus wirtschaftlichen Gründen üblich - seit jeher erfasst, compoundiert und der verarbeiteten Neuware zugefügt. Die Zugabe erfolgte in geringen Prozentsätzen, um mögliche Risiken bei der Produktqualität auszuschließen.

Steigende Entsorgungskosten waren die Motivation zurückkommende Geräte z.B. infolge von Transportschäden oder Überproduktion, zu zerlegen, zu fraktionieren und möglichst viele Bestandteile wiederzuverwenden oder zu verwerten. Die zunehmende Menge anfallender Kunststoffteile führte dazu, sich genauer mit dem Recycling dieser Teile zu beschäftigen, mit dem ökonomischen Ziel den Recyclatanteil im Neumaterial bei der Gehäuseproduktion erhöhen zu können.

Vor diesem Hintergrund wurde 1993 das Öko-Technologie Zentrum gegründet, das sich in direkter Zusammenarbeit mit der werkseigenen Spritzgussabteilung zum Demontage- und Recyclingzentrum entwickelte. Ausgangspunkt war die Aufarbeitung von Fehlchargen und Rückläufen aus den eigenen Kundendienstzentren. Mit zunehmender Erfahrung wurden schrittweise Geräte und Kunststoffteile von externen Demontage- bzw. Verwertungsbetrieben übernommen. Diese übernehmen im Gegenzug die bei der Gerätezerlegung anfallenden Metall- und Leiterplattenfraktionen.

Mit dem Ziel, einen Werkstoff für die Produktion von Fernsehgehäusen zu entwickeln, der ausschließlich aus Recyclaten besteht, wurde von Dezember 1995 bis Dezember 1997 ein vom Bayerischen Forschungsverbund Abfallwirtschaft und Reststoffverwertung (BayFORREST) gefördertes Forschungsvorhaben „**Originäre Wiederverwertung von Kunststoffen**“ durchgeführt. Es gelang im Rahmen dieses Projektes den gewünschten Recyclingwerkstoff zu entwickeln.

Der Werkstoff mit dem Markennamen SYSPLAST® wird derzeit bei Grundig in einer Menge von ca. 800 t/a produziert und zu 100% für die Herstellung von Fernsehgehäusen eingesetzt. Diese Menge deckt ca. 40% des gesamten Kunststoffbedarfes des Produktionsstandort Nürnberg.

Die Entwicklung der Sortier-, Demontage und Qualitätssicherungsprozesse für die kontinuierliche Produktion dieses Recyclingwerkstoffes aus verschiedenen Altmaterialquellen erfolgte im Rahmen eines z.T. parallel zum BayFORREST-Projekt durchgeführten Forschungsprojektes „**Industrieller Rückbau von Elektronik Altgeräten in Kreisläufen**“ (IREAK; gefördert vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung).

Entwicklung des Prozesses zur Gewinnung von SYSPLAST®

Zieldefinition

Ziel des Prozesses ist ein Fernsehgehäuse aus 100 % Recyclingkunststoff.

Werkstoffauswahl

Aus den grundsätzlich in Frage kommenden Kunststoffen **ABS** (Acrylnitril-Butadien-Styrol Copolymer) und **SB** (Styrol-Butadien Copolymer) erfolgte die Auswahl anhand folgender Kriterien:

- Rheologie: Infolge der komplizierten Geometrie von Gehäusen und den z.T. langen Fließwegen beim Spritzguss spielt eine definierte, konstante Fließfähigkeit der Schmelze im Verarbeitungsprozess eine wesentliche Rolle
- Mechanische Eigenschaften: Das Gehäuse muss den während der Montage (Einbau der Bildröhre) auftretenden statischen Belastungen und den während des Transportes auftretenden dynamischen Beanspruchungen standhalten.
- Brandeigenschaften: Die Anforderungen der EN 6006 müssen ohne Zusatz von Flammhemmern erfüllt werden (GRUNDIG setzt in seinen Gehäusen seit 1996 keine Flammhemmer mehr ein)
- Lackierfähigkeit: Bei GRUNDIG werden alle Gehäuse mit Wasserlacken auf Acrylatbasis lackiert, was eine gleichmäßige Benetzbarkeit der Oberfläche voraussetzt.

- Farbe: Da die Lackschicht nur 12 µm stark ist, muss das Gehäuse eine gleichbleibende Oberflächenfarbe aufweisen.

Auf der Basis von praktischen Vorversuchen stellte sich heraus, dass die Materialanforderungen an den Gehäusewerkstoff nur im Fall von ABS auch bei Einsatz von 100% Recyclat erfüllt werden konnten. Bei Verwendung von SB war die Recyclatzugabe mit max. 20% begrenzt.

Flexible Sortier- und Zerlegeprozesse für die Bereitstellung geeigneter Kunststoffteile

Ähnlich wie im Fall ZME stellt die Auswahl der für die Herstellung des definierten Recyclingwerkstoffes in Frage kommenden Geräte und Geräteteile den entscheidenden Schritt dar. GRUNDIG bezeichnet diesen Schritt als „Vereinnahmung“. GRUNDIG verzichtet auf eine mechanische Aufbereitung der Geräte und setzt zumindest derzeit ausschließlich auf händische Demontage.

Materialquellen: Es stehen eigene Produktionsrückläufe, Altgeräte aus Kundendienstzentren und Niederlassungen sowie Zulieferungen definierter, bereits demontierter Kunststoffteile von Systempartnern aus dem Bereich der EAG-Sammlung und -Verwertung zur Verfügung.

Vereinnahmung, Sortierung und Demontage: Die Vereinnahmung umfasst die Übernahme der gebrauchten Ware sowie erste Zerlegesritten zur Abtrennung von Schad- und Störstoffen sowie einfach und schnell entfernbaren Wertstoffen, wie z.B. Netzkabel, Antennen, Kassettenfach. Die Bildung von Zwischenlagerkategorien gemäß dem Prinzip der „Stoffgleichheiten“ hat sich als wertvoll im Hinblick auf die Effizienz der weitere Arbeitsschritte erwiesen. Dabei werden Geräte sowohl nach Gerätetyp als auch nach verwendeten Materialien eingeteilt z.B. Fernsehgeräte mit Gehäusewerkstoff Holz, Fernsehgeräte mit Gehäusewerkstoff Kunststoff u.ä.

Die Sortierung und Demontage erfolgen händisch im Hinblick auf eine Zuordnung der Teile zu 11 Verwertungsebenen, die im Laufe des Projektes festgelegt wurden und nicht nur Kunststoffteile umfassen. Nach der Bildung der den Verwertungsebenen entsprechenden Materialfraktionen kommen für manche auch mechanische Aufbereitungsschritte zum Einsatz.

Verwertungsebenen:

Ebene 1	Thermoplastische Kunststoffe, amorph
Ebene 2	Thermoplastische Kunststoffe, teilkristallin
Ebene 3	Baugruppen – Laufwerke
Ebene 4:	Eisenmetalle
Ebene 5	Nicht-Eisenmetalle
Ebene 6	Glas 1 – Bildröhren, Leuchtstoffröhren
Ebene 7	Glas 2 – Glasscheiben, Glühbirnen u.ä.
Ebene 8	Sondermüll – Kondensatoren, Batterien, Akkus, Knopfzellen
Ebene 9	Elektronik – Leiterplatten, Displays, Stecker, Schalter, Regler usw.
Ebene 10	Edelmetalle
Ebene 11	Flüssigkeiten, Gase

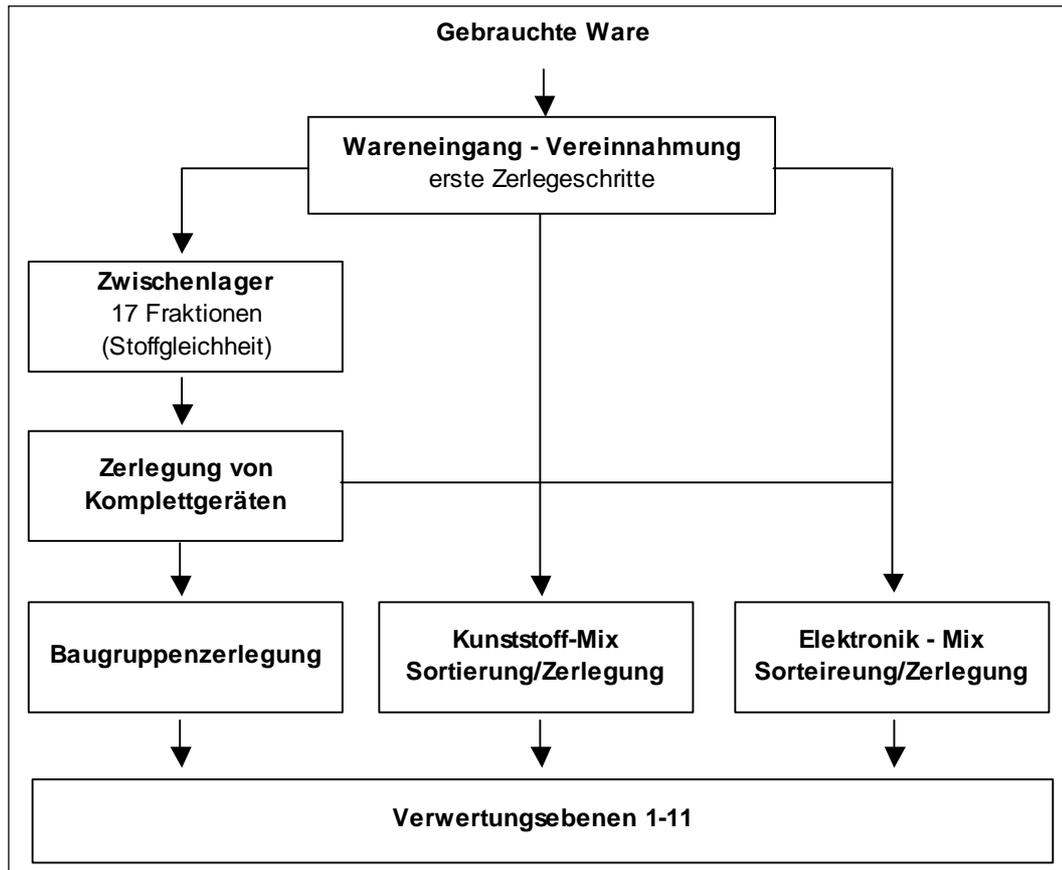


Abb. IV-7: Demontage von EAG (16,17)

Kunststoffteile bilden die Verwertungsebenen 1 und 2. Die Verwertungsebene 1 umfasst amorphe Thermoplaste wie z.B. Polystyrol (PS), ABS, SB, Polycarbonat (PC), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polyvinylchlorid (PVC). Der Verwertungsebene 2 sind teilkristalline Kunststoffe zugeordnet wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamide (PA).

Innerhalb der beiden Kunststoffgruppen wird anhand folgender Kriterien weiter differenziert:

Kunststoffsorte/Produkt: Identifizierung der Kunststoffe durch Eingrenzung aufgrund von Kenntnissen aus dem Bereich der Geräteherstellung: z.B. werden für Fernsehgehäuse weltweit nur ABS oder SB verwendet; für transparente Kunststoffteile kommen im Bereich der Unterhaltungselektronik PMMA, PC oder PS zum Einsatz. Innerhalb des eingeschränkten „Sortiments“ erfolgt die weitere Sortierung mit sehr einfachen Methoden wie z.B. dem Lösemitteltest, der Bruchprobe u.ä.

Sortierkriterium Industriesparte: Mit dem Ziel einen Gehäusewerkstoff zu produzieren, kommen im Fall Grundig nur Kunststoffteile aus den Bereichen Unterhaltungselektronik, Spielzeugindustrie und Haushaltsgeräte als Altmaterialquellen in Frage.

So wird beispielsweise ABS auch häufig im Automobilbereich eingesetzt, aufgrund erhöhter Anforderungen an die Wärmeformbeständigkeit aber entsprechend modifiziert.

Diese Modifikationen führen dazu, dass sich beim Zumischen von ABS aus dem Automobilsektor zu ABS aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik bei der Verarbeitung an der Oberfläche des Kunststoffteiles Schlieren bilden.

Sortierkriterium Applikation: Verschiedene Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe erfordern unterschiedliches Verhalten des Kunststoffes in der Schmelze. Je nach Verarbeitungstechnologie unterscheidet man daher bei grundsätzlich gleichen Kunststoffsorten noch verschiedene Typen, die sich z.B. im Bereich der Molekulargewichtsverteilung unterscheiden. Beim Recycling sollte das Verarbeitungsverfahren nach Möglichkeit gleich bleiben: Spritzgusstypen sollten möglichst wieder für die Spritzgussverarbeitung eingesetzt werden, Extrusionstypen wieder für Extrusion. An einem konkreten Kunststoffteil lässt sich das angewandte Verarbeitungsverfahren in der Regel leicht erkennen: Angusspunkte beim Spritzguss und Spritzblasen, Nahtstellen beim Extrusionsblasen, Wissen darüber, welche Produkte mit welchen Verfahren hergestellt werden.

Sortierkriterium Additive: Füll- und Verstärkungsstoffe haben einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften und das Verarbeitungsverhalten von Kunststoffen. Je nach gewünschtem Einsatzbereich für das Recyclat ist zu überprüfen in welchem Ausmaß auch gefüllte Altkunststoffe verwendet werden können. Im Fall von Grundig-Fernsehgehäusen kann nur ungefülltes Material zum Einsatz kommen.

In der Gruppe der anorganischen Farbpigmente für Kunststoffe finden sich auch Schwermetallverbindungen wie z.B. Cadmiumsulfide. Da Cadmiumsalze überwiegend für rote und gelbe Farbtöne, vereinzelt auch für Brauntöne und Hellgrün (Mischung aus gelb und blau) zum Einsatz kamen, gelingt es, durch eine Farbsortierung einen Großteil der „kontaminierten“ Kunststoffteile aus dem Altstoffstrom auszuschleusen. Konkret erfolgt die Sortierung bei Grundig in fünf definierte Farbgruppen:

- Farbgruppe 1: Hellgelb bis Dunkelrot
- Farbgruppe 2: Hellgrün bis Dunkelbraun
- Farbgruppe 3: Hellblau bis Dunkelblau
- Farbgruppe 4: Weiß bis Dunkelgrau
- Farbgruppe 5: Schwarz

Die Farbsortierung bringt neben dem Ausschleusen von cadmiumhaltigem Material (kommt nur in Farbgruppe 1 und 2 vor) Vorteile bei der Einfärbung des Recyclates.

Im Fall des Grundig-Recyclingwerkstoffes sind flammgeschützte Materialien absolut unerwünscht, da Grundig in seinen Gehäusen generell keine Flammenschutzmittel mehr einsetzt. Die Unterscheidung zwischen flammgeschützten und nicht flammgeschützten Kunststoffen erfolgt bei Grundig einerseits aus Erfahrung und andererseits durch eine einfache Brennprobe.

In Zweifelsfällen erfolgt eine endgültige Identifizierung der sortierten unter Einsatz eines IR-Spektrometers. Die auf diese Weise in den Verwertungsebenen 1 und 2 gebildeten Kunststofffraktionen werden zu Mahlgütern verarbeitet, die im Fall von ABS für die interne Produktion von SYSPLAST® dienen.

Mahlgüter, die in der eigenen Produktion bei GRUNDIG nicht zum Einsatz kommen, werden an die Ursprungslieferanten übergeben oder auf dem Sekundärmarkt verkauft. Bei den Ursprungslieferanten (Rohstoffhersteller) finden diese Mahlgüter in der Regel Eingang in die Produktion sogenannter R-Typen und müssen daher definierten Lieferbedingungen und Qualitätsanforderungen wie Schmelzindex, Farbe, Korngröße, Staubgehalt usw. gerecht werden.

Auf dem Sekundärmarkt verkaufte Mahlgüter werden diesen Anforderungen nicht gerecht und finden dann in weniger anspruchsvollen Produktsegmenten Verwendung.

Ökonomische und ökologische Aspekte

Für Grundig ist die Herstellung von SYSPLAST in der gegenwärtig durchgeführten Weise auch ökonomisch sinnvoll. Die Differenz zwischen dem Preis für ABS-Neuware und den Produktionskosten für SYSPLAST® liegt bei DM 1,5-1,8//kg (€0,75-0,9/kg).

Die Technische Universität in Cottbus hat eine ökologische Bilanzierung der Herstellungsprozesse für primäres ABS und SYSPLAST® durchgeführt. Die erstellte Sachbilanz wurde mit Hilfe verschiedener Methoden bewertet und die erhaltenen Bewertungen miteinander verglichen. Für die Bewertung wurden herangezogen: Umweltbelastungspunkte, Ecoindikatoren, Kumulierter Energieaufwand (17).

Tabelle IV-12: Kumulierter Energieaufwand ABS-Neuware / SYSLAST ®

1 Tonne ABS	Neuware (=100%)	SYSPLAST ®	
Kumulierter Energieaufwand	25 MWh	4 MWh	16%

Tabelle IV-13: Bilanzbewertung nach Umweltbelastungspunkten

650 t ABS	Neuware	SYSPLAST ®	
Abfall	162 725 000	12 005 800	7%
Energie	59 039 100	6 143 230	15%
Luftbelastung	525 895 000	111 440 000	21%
Wasserbelastung	7 748 940	291 651	4%
Gesamt	755 408 040	132 880 681	18%

Quelle: Abschlußbericht IREAK Teilvorhaben 3, Grundig AG, Schultheis, Biegel (17)

Tabelle IV-14: Bilanzbewertung ABS-Neuware/Sysplast nach Eco-Indikatoren

650 t ABS	Neuware (=100%)	SYSPLAST ®	
Treibhauseffekt	808	188	23 %
Ozonbildungspotenzial	0	0	
Versauerung	2063	494	24%
Eutrophierung	271	40	15%
Schwermetalle	481	22	5%
Kanzerogenität	6	17	285%
Winter Smog	895	235	26%
Sommer Smog	93	11	12%
Pestizide	0	0	0%

Quelle: Abschlußbericht IREAK (17)

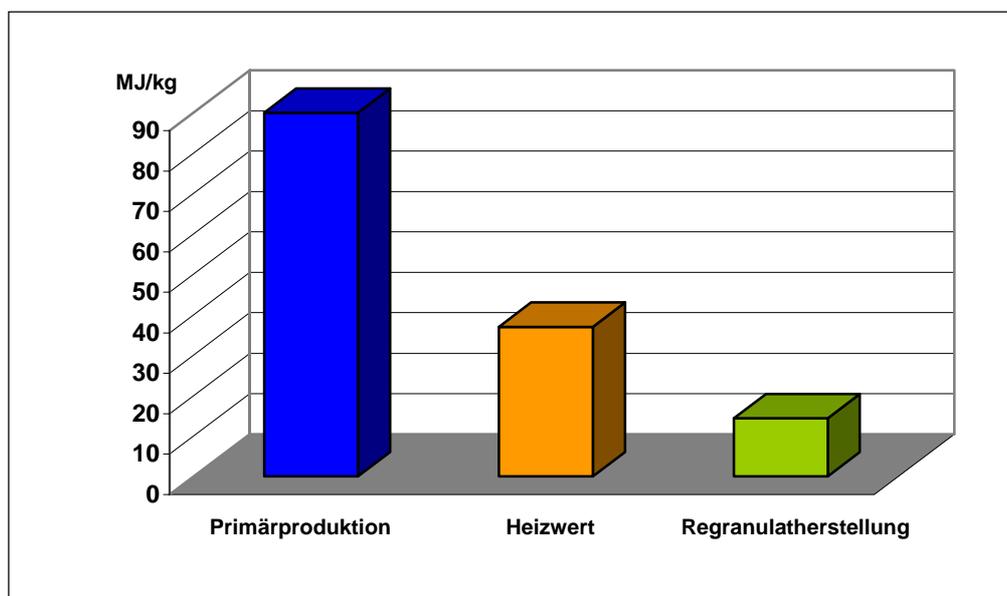


Abb.IV-8: ABS: Energieaufwand für Herstellung und Recycling versus Heizwert

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Bilanzbewertungsergebnisse zeigt methodenbedingt Unterschiede. Ungeachtet der geringen Abweichungen in den Gesamtbewertungen bestätigen sie alle die ökologischen Vorteile der stofflichen Verwertung im Fall von SYSPLAST: sie verursacht im Vergleich zur Neuware nur etwa 22% der Umweltbelastungen. Der kumulierte Energieaufwand liegt sogar unter dem Heizwert von ABS, sodass die stoffliche Verwertung auch im Vergleich zur thermischen Verwertung im Vorteil ist.

Die Herstellung von SYSPLAST® ist aufgrund der außergewöhnlichen Rahmenbedingungen - Engagement eines großen Geräteherstellers, der auch die Rolle des Recyclers/Compoundierers, des Kunststoffverarbeiters und Anwenders des aus dem Recyclat produzierten Gehäuses übernimmt - sicher ein extremer Ausnahmefall. Die angewandte Vorgangsweise berücksichtigt sämtliche für eine qualitativ hochwertige und langfristig ökonomisch erfolgversprechende stoffliche Verwertung von Kunststoffen relevanten Kriterien und hat damit so etwas wie Vorbildcharakter.

Der Anspruch des geschlossenen Produktkreislaufes - Recyclat aus Fernsehgeräten wird wieder für die Herstellung von Fernsehgeräten eingesetzt - ist sehr hoch und nur sehr wenige der derzeit im Rahmen etablierter Verwertungsschienen aus Post Consumer Abfällen - z.B. aus dem Verpackungsbereich - gewonnenen Recyclate werden diesem Anspruch einigermaßen gerecht.

Für die Praxis einer sinnvollen stofflichen Verwertung ist der ideale Produktkreislauf aber nicht so entscheidend wie auch das Beispiel SYSPLAST® zeigt: Nur ein Teil der Eingangsmaterialien für die Recyclatproduktion stammt aus alten Fernsehgehäusen, daneben kommen Produktionsabfälle und auch zugekaufte definierte Mahlgüter zum Einsatz, die auch aus „Nicht-Elektro/Elektronikanwendungen“ stammen. Entscheidend ist vielmehr die klare Zielvorgabe: Herstellung eines Recyclingwerkstoffes für einen Anwendungszweck, der den gestellten Materialanforderungen und in der Folge Produkthanforderungen gerecht wird.

IV.1.2.4 Perspektiven für die stoffliche Verwertung

Schließung von Kunststoffkreisläufen – Aufbau regionaler Recyclingnetzwerke

Das Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart hat in einer Machbarkeitsstudie für das Ministerium für Umwelt und Verkehr in Baden-Württemberg die Möglichkeiten für die Schließung von Produktkreisläufen am Beispiel eines Kunststoffteiles untersucht (12).

Ausgehend vom vorgegebenen Anfangspunkt, Kunststoffabfällen aus EAG, und dem gewünschten Ziel, der Herstellung eines Bauteiles aus Kunststoffrecyclat für den Einsatz in neuen Elektro-/Elektronikgeräten, entwickelt das IPA in seiner Arbeit schrittweise den Aufbau eines Recyclingnetzwerkes. Das Modell stützt sich dabei auf Wissen und Erfahrungen aus der Kunststoffverarbeitung, -anwendung und -verwertung, berücksichtigt eigene Forschungsergebnisse und bindet Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Projekten aus dem Bereich EAG ein (wie z.B. IREAK, ProMeKreis). Als Teilnehmer des Modells sieht das IPA Produkthersteller, Demontagebetriebe, Aufbereitungsbetriebe, Verarbeitungsbetriebe und Logistikunternehmen.

Auf der Basis der Rahmenbedingungen am Anfangsort, charakterisiert durch die Art und die Menge der anfallenden Kunststoffe und die Erfahrungen über das Verhalten und die Änderung technischer Eigenschaften verschiedener Kunststoffe beim Recyclieren, werden die in Frage kommenden Kunststoffe, die verfügbaren Mengen und die möglichen Lieferanten gefunden.

Im nächsten Schritt kann die Auswahl der Bauteile erfolgen, für deren Herstellung die verfügbaren Kunststoffe grundsätzlich geeignet erscheinen. Aus verschiedenen Möglichkeiten erfolgt durch schrittweise Eingrenzung die Auswahl eines konkreten Bauteiles und die Festlegung der Anforderungen (Qualität und Kostenvorteile gegenüber Neuware!) an das Input-Material.

Aus diesen Anforderungen werden Zielvorgaben für die Demontage-, die Aufbereitungs- und Verarbeitungsbetriebe abgeleitet und auf den verschiedenen Bearbeitungsstufen die notwendige Input/Outputqualität definiert, um nach Durchlaufen des gesamten Aufbereitungszyklus die gewünschte Materialqualität in ausreichender Menge bereitstellen zu können.

(Die Darstellungen der ABB. IV-8 bis IV-10 wurden den Präsentationsunterlagen des IPA für das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg entnommen)

Abb. IV-8: Schematische Darstellung des IPA Modells für das „Regionale Kreislaufnetzwerk für Kunststoffe“

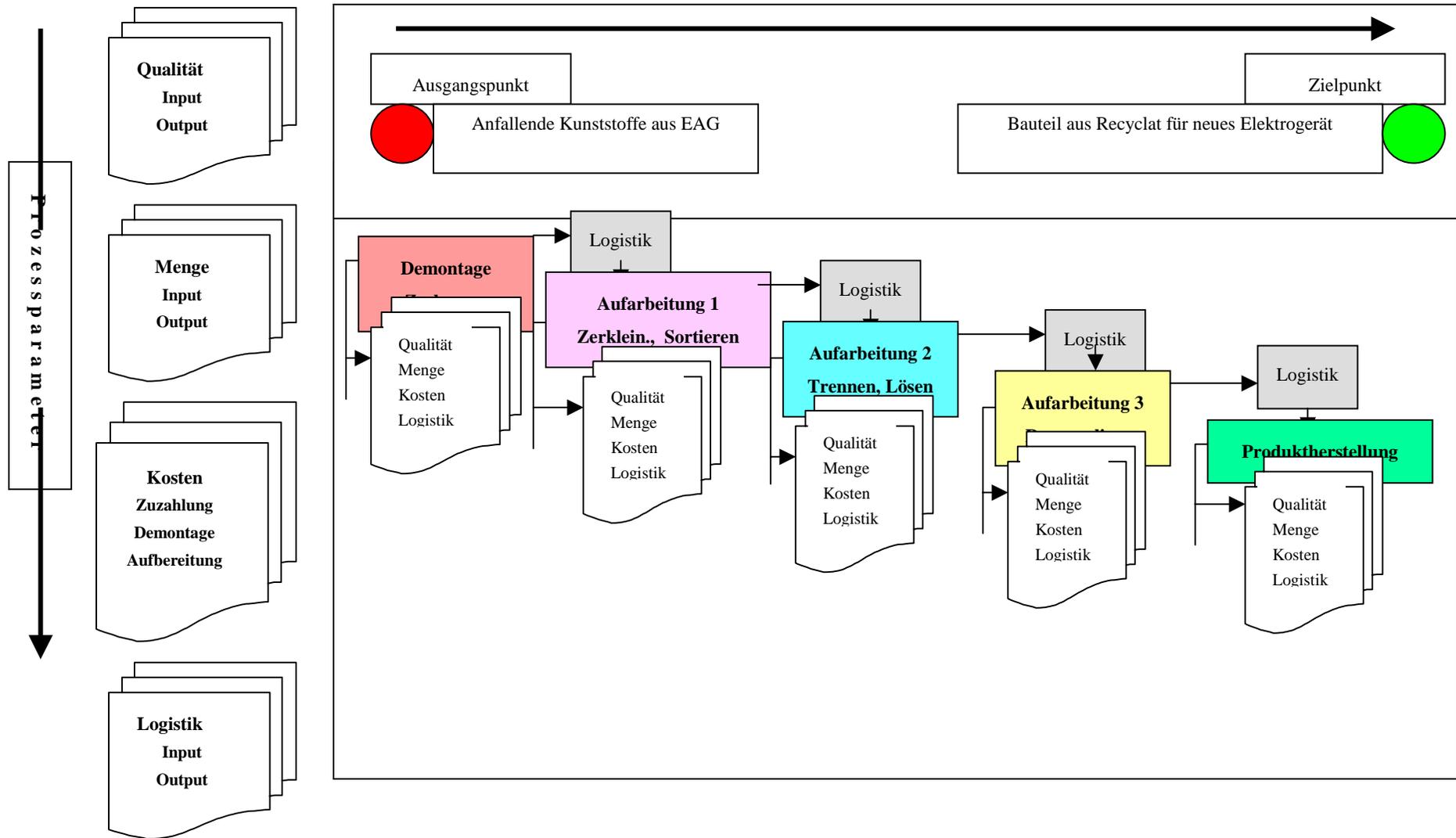


Abb. IV-9: Zielvorgaben in den verschiedenen Behandlungsmodulen des IPA Modells für das „Regionale Kreislaufnetzwerk für Kunststoffe“

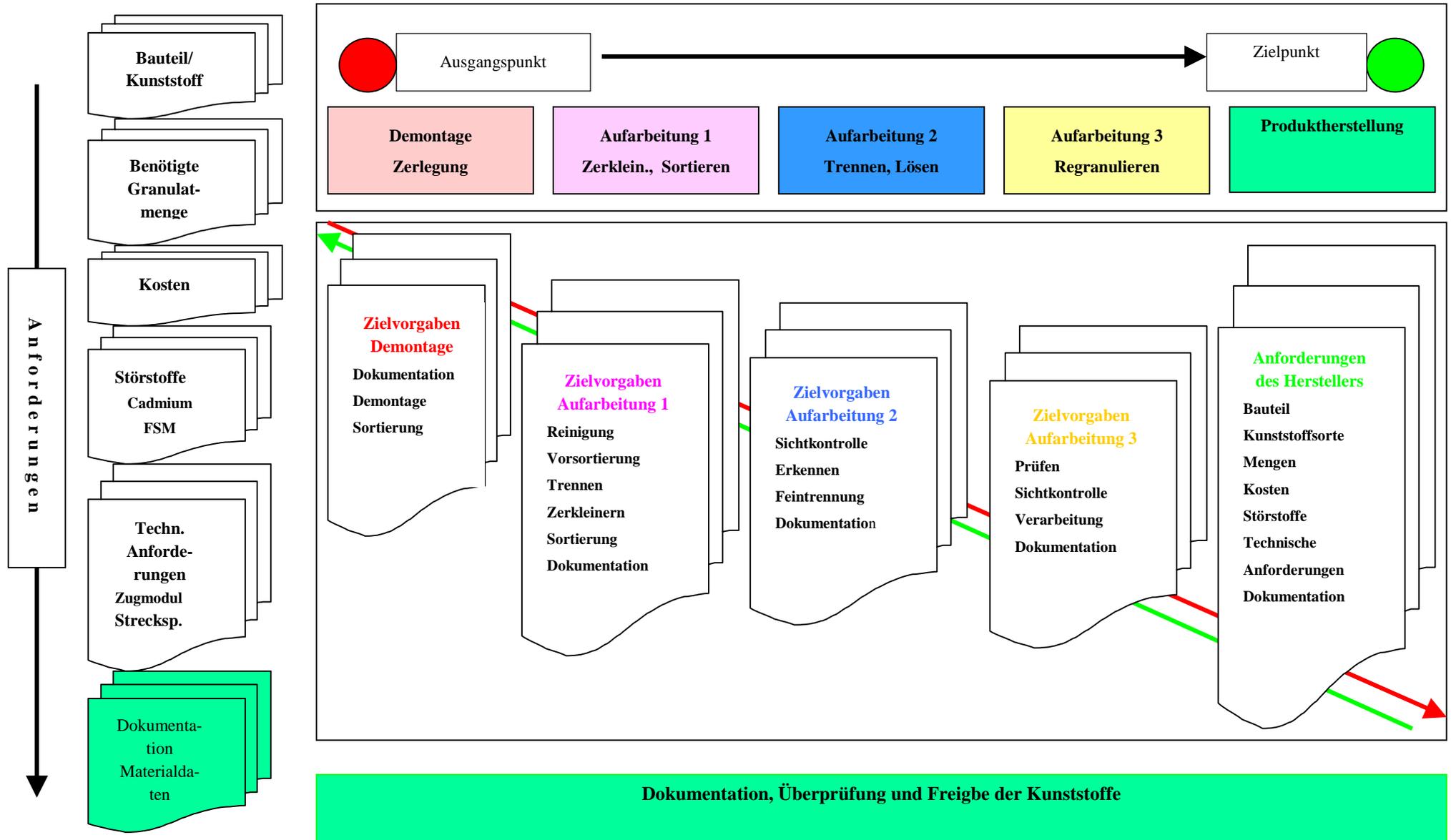
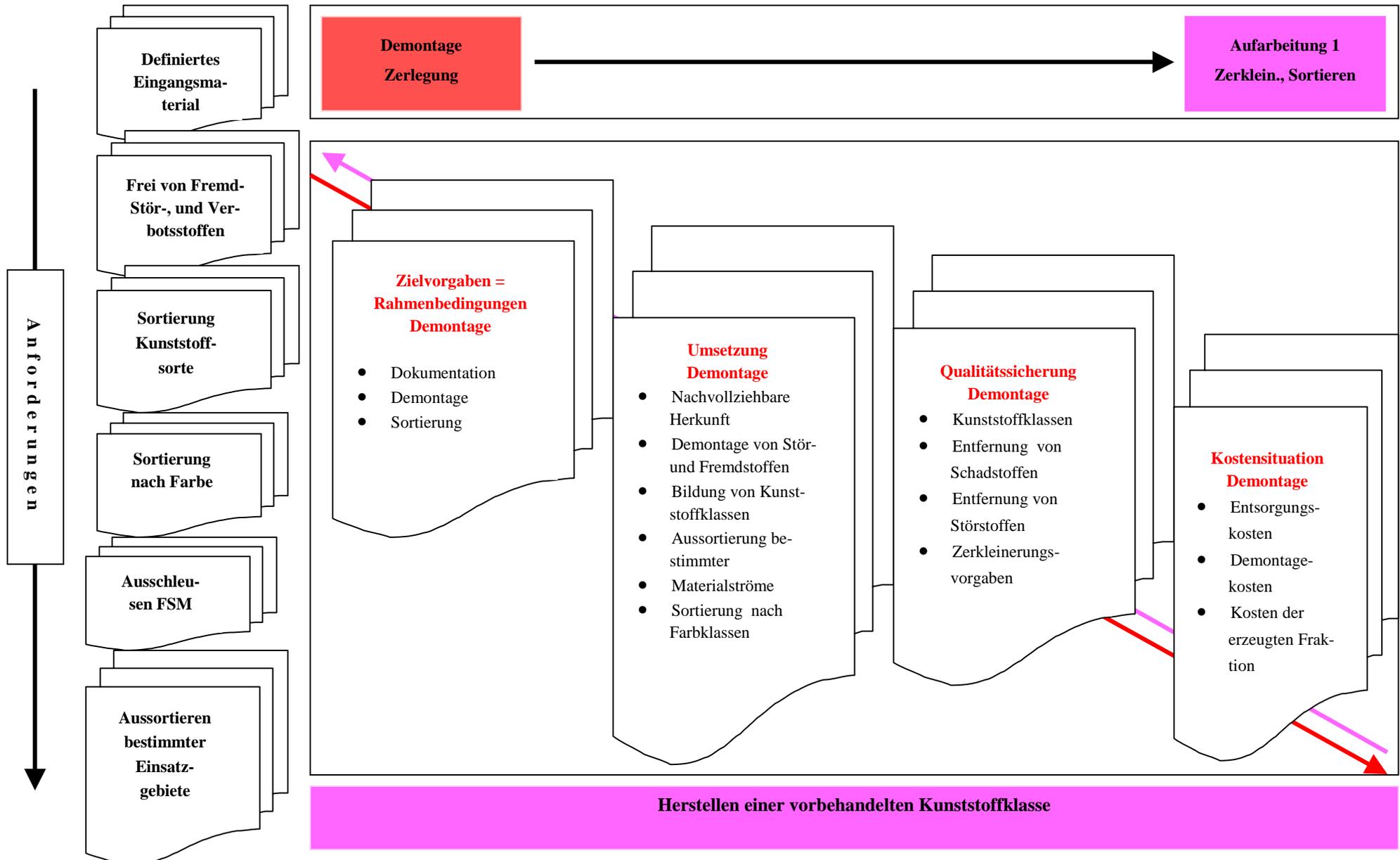


Abb. IV-10: Umsetzung der Zielvorgaben für das Modul Demontage im IPA-Modells



Für die Umsetzung des Modells bieten sich als Alternativen der Aufbau von Verwertungslinien oder Verwertungsinseln an. Verwertungslinien sind dadurch gekennzeichnet, dass die verschiedenen Behandlungsschritte auf dem Weg zum qualitätsgesicherten Regranulat an einem Standort durchgeführt werden (z.B. Variante „Grundig“). Die Variante Verwertungsinseln geht davon aus, dass sich einzelne Betriebe auf einen der notwendigen Verfahrensschritte spezialisieren und im Rahmen eines Netzwerkes quasi „gemeinsam“ das qualitätsgesicherte Regranulat dem Produkthersteller liefern. Das Modell der Verwertungsinseln zeigt insofern Vorteile, als es regional vorhandene Kapazitäten nutzt, durch Spezialisierung und Verfahrensoptimierungen die Auslastung der Betriebe verbessert, die Qualität fördert und flexibel auf Weiterentwicklungen des Standes der Technik reagieren kann. Nachteilig sind ein erhöhter Logistikaufwand und insgesamt höhere Systemkosten. Ein System von Verwertungsinseln ist hinsichtlich des Logistikaufwandes und der Kosten im Vorteil, erfordert im Gegenzug aber meist hohe Investitionskosten und ist weniger flexibel.

Das IPA führt auch eine Kostenkalkulation für die einzelnen Behandlungsmodule und den erforderlichen Logistikaufwand durch. Das Ergebnis der Kostenkalkulation für PP-Regranulat (Variante Verwertungsinseln) bei einem angenommenen Neumaterialpreis von DM 1.600/t (€813 /t), und einem Entsorgungspreis von DM 200/t (€102/t), ist in schematisch wiedergegeben.

Das IPA kommt in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass ein Schließen von regionalen Produktkreisläufen auch im Bereich von Kunststoffen machbar ist. Das vorgestellte Modell zeigt einmal mehr die Notwendigkeit der Zusammenarbeit von Materialproduzenten (= Demontage, Sortierung, Regranulation), Verarbeitern und Anwendern für das Zustandekommen einzelner Produktkreisläufen und in der Folge eines funktionierender Marktes. Andererseits weist das IPA aber auch darauf hin, dass für die Realisierung eines derartigen Modells nicht nur Engagement aller Teilnehmer notwendig ist, sondern kurzfristig auch Anreiz und Unterstützung durch Öffentlichkeit und Behörden vor allem auch im Hinblick auf die Verbesserung der Kostensituation.

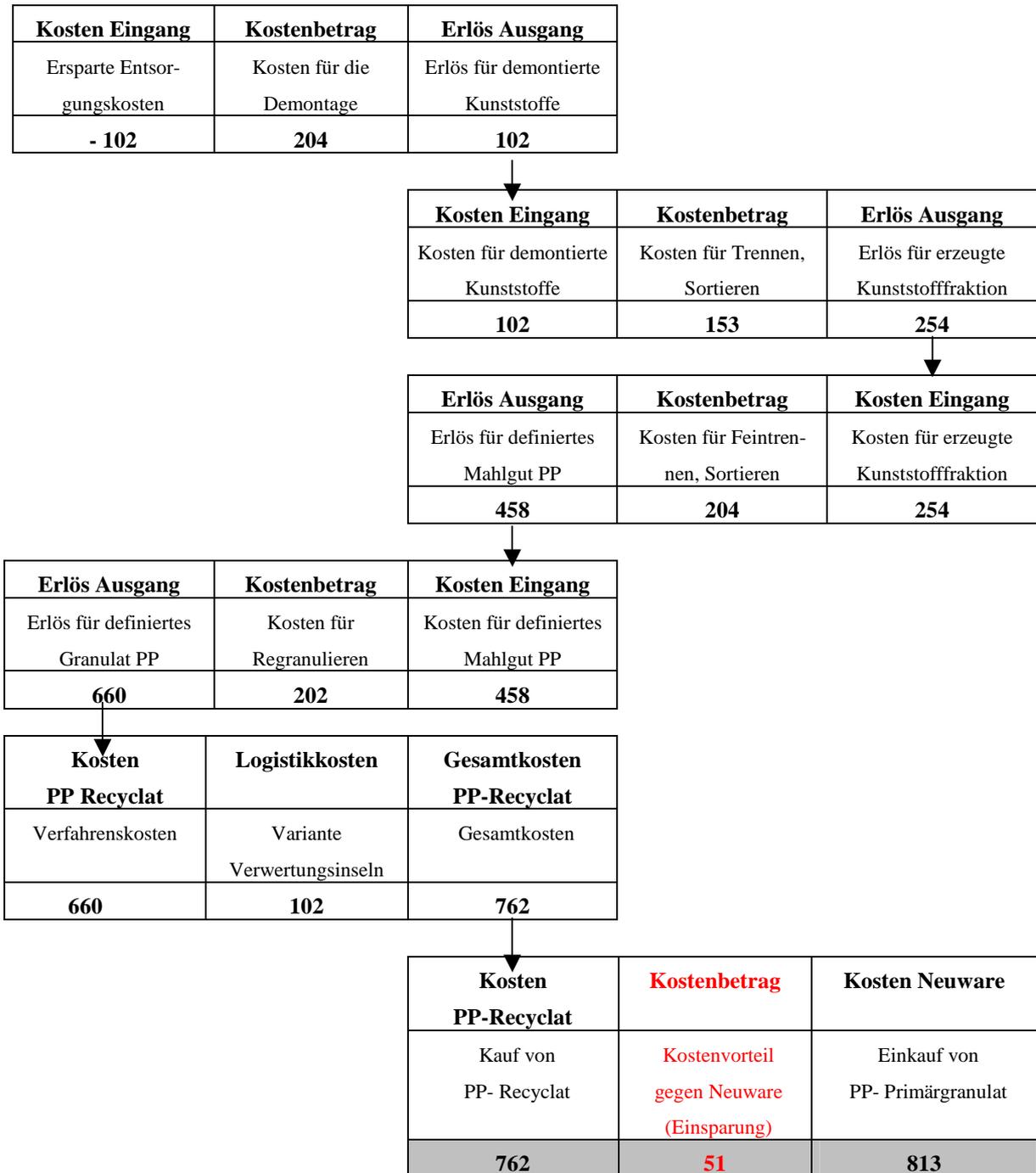


Abb. IV-11: Beispielhafte Kostenkalkulation für das IPA-Modell (Angaben in €/t)

IV.1.3 Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG

IV.1.3.1 Hydrierung

Die Anwendbarkeit der Hydrierung für die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen aus EAG wurde in der Kohleölanlage Bottrop untersucht (1). Die Versuche bestätigten die Eignung der Anlage bzw. der Kunststoffabfälle für diesen Verwertungsweg. Obwohl die Kohleölanlage mit Ende des Jahres 1999 ihren Betrieb einstellte und die Hydrierung derzeit keine praktische Verwertungsoption darstellt, sind der Vollständigkeit halber die wichtigsten Versuchsergebnisse dargestellt:

- Die für die Versuche eingesetzten Kunststoffe stammten aus der Demontage von EAG aus dem Konsum- und Investitionsgüterbereich eines deutschen Elektronikschrottverwerter (RDE in Puhlheim).
- Für den Einsatz in der Hydrieranlage wurden die E & E Kunststoffe im Verhältnis 1:5 mit dem normalen Inputmaterial der Anlage – agglomerierten Mischkunststoffen aus der DSD Sammlung – gemischt, da bei der Verarbeitung von ausschließlich E & E Material das Depolymerisat aufgrund zu hoher Viskosität nicht pumpfähig war und zur Verkokung neigte.
- Im Rahmen der Versuche wurden 50 t E & E Material gemeinsam mit 250 t DSD Material bei einem stündlichen Durchsatz von 5 t hydriert.
- Die Reaktivität bei der Depolymerisation des Testmaterials war größer als bei DSD Material, was auf den Anteil an Polycarbonat zurückzuführen sein dürfte. Der Polycarbonatgehalt ist auch für den erhöhten Anteil von CO und CO₂ im Depolymerisationsgas verantwortlich. (PC zersetzt sich bei 320°C zu CO, CO₂ und einen braunen Rückstand). Das Depolymerisat zeigt gegenüber typischen DSD Qualitäten höhere Anteile an Brom und Fluor.
- Die Hydrierprodukte entsprachen den Spezifikationen der Anlage und der Produktabnehmer.

Tabelle IV-15: Herkunft der Kunststoffe

Herkunft der Kunststoffe	Anteil %
PC und Monitore	45
Drucker und Faxgeräte	17
Fernseher	15
Kommunikationstechnik	12
E+MSR Geräte	5
Haushaltsgeräte	4
Diverses	2

IV.1.3.2 Synthesegas/Methanolherstellung

Im Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe (SVZ) werden kohlenwasserstoffhaltige Abfallstoffe zu Synthesegas vergast. Die am Industriestandort „Schwarze Pumpe“ in Spreetal/Spreewitz (Grenze Brandenburg/Sachsen) existierenden Anlagen zur Vergasung von Braunkohle wurden zu einem Abfallverwertungszentrum um- und ausgebaut. Die Anlage wurde im Zuge ihres Um-/Ausbaues und im Zusammenhang mit den behördlichen Genehmigungen auch einer umfassenden Umweltüberprüfung unterzogen.

Das Spektrum der Abfälle, die im SVZ verwertet werden können, ist groß und umfasst neben verschiedenen industriellen Abfällen aufbereiteten Hausmüll, Klärschlämme, kontaminiertes Altholz und Mischkunststoffe.

Das Verfahren ist ausgesprochen flexibel was die Zusammensetzung des Vergaserinputs betrifft. Zur Gewährleistung eines stabilen Vergaserbetriebes werden die Abfälle aber in Form definierter Mischungen eingesetzt. Verfahrensbedingt wird den Einsatzstoffen auch Braunkohle zugesetzt, wobei der Braunkohleanteil variabel ist. Bezogen auf den jährlichen Gesamtdurchsatz der Anlage beträgt er derzeit rund 20%.

Die Zusammensetzung des Inputs beeinflusst die Art und die Qualität der Verwertungsprodukte nicht, wohl aber die entstehenden Mengen an Synthesegas und Methanol. Kunststoffe zeigen ein für die Synthesegasherstellung günstiges Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff.

Neben Mischkunststoffen aus der Verpackungssammlung werden im SVZ derzeit auch Kunststoffe aus der Aufbereitung von EAG im Umfang von ca. 50 t/Woche verwertet. Die im Vergleich zu Verpackungsabfällen erhöhten Halogen- und Schwermetallkonzentrationen in den EAG-Kunststoffen sind im Rahmen dieses Verwertungsverfahrens weniger problematisch.

Nichtflüchtige Schwermetalle werden im Festbettdruckvergaser in die Schlacke bzw. in die Asche eingebunden. Die Betriebstemperatur der Vergaser liegt nahe am Ascheerweichungspunkt, wodurch eine für den Bindungsprozess ausreichende Reaktivität der Asche und ausreichend lange Reaktionszeit gewährleistet ist.

In dem gesinterten Schlacke/Asche-Produkt liegen die Schwermetalle in schwer eluierbarer Form vor. Die flüchtigen Schwermetalle Hg, Cd und ev. Zn gelangen im Festbettvergaser in den Rohgasstrom und werden aufgrund der reduzierenden Atmosphäre und in Gegenwart von Schwefelwasserstoff in schwerlösliche Sulfide und Hydroxide überführt. In der Gaskondensation gelangen sie in die flüssige Teer/Öl-Phase und werden mit dieser der Flugstromvergasung zugeführt. Die Flugstromvergasung arbeitet oberhalb des Ascheschmelzpunktes und liefert eine flüssige, glasartige Schlacke in der die Schwermetalle eingebunden sind. Im Synthesegas noch verbleibende Schwermetallspuren werden in einer Feingasreinigung mit Hilfe von Aktivkohlefiltern entfernt.

Die hohen Betriebstemperaturen in den Vergasern 800 -1.200°C im Festbettvergaser bzw. 1.600 –1.800°C im Flugstromvergaser sorgen für die sichere Zerstörung von Dioxinen/Furanen und anderen organischen Schadstoffen. Um eine Denovo-Synthese von Dioxinen/Furanen zu vermeiden, erfolgt eine schockartige Abkühlung der Rohgase nach den Vergasern. Im Rohgas des Festbettvergasers noch vorhandene Dioxine/Furane werden im Quencher zusammen mit kondensierbaren Anteilen abgeschieden und gelangen in die Flugstromvergasung, in der sie sicher zerstört werden. Die Dioxinkonzentrationen im Reingas liegen im allgemeinen unter 2 pg TE/m³, zum Teil unter der Nachweisgrenze.

IV.1.3.3 Indirekte Verfahren zur rohstofflich/thermischen Verwertung

IV.1.3.3.1 Metallurgisches Verfahren

Aufgrund ihres Gehaltes an Metallen, die einen wertvollen Strom von Sekundärmaterialien darstellen, konzentriert sich die Verwertung von EAG und Elektronikschrott auf die Rückgewinnung dieser Stoffe. Neben der mechanischen Aufarbeitung von EAG kommen dafür grundsätzlich auch metallurgische Prozesse in Frage. Der Einsatz von Elektronikschrott v.a. Leiterplatten zur Gewinnung von sekundären Nicht-Eisenmetallen ist in der Praxis üblich. Im Zusammenhang mit der Diskussion um mögliche Verwertungsverfahren für EAG stellt sich die Frage, ob und unter welchen Bedingungen auch zerkleinerte EAG als Rohstoffquelle für metallurgische Recyclingprozesse geeignet sind. Da es sich bei den in Frage kommenden Verfahren chemisch gesehen durchwegs um Reduktionsvorgänge handelt, kann der in den EAG enthaltene Kunststoff nicht nur die Rolle eines Brennstoffes, sondern auch die Funktion eines Reduktionsmittels übernehmen.

Die prinzipielle Anwendbarkeit metallurgischer Verfahren für die Verwertung von EAG und die Auswirkungen auf den Prozessablauf und die Emissionen wurden im Rahmen eines mehrjährigen Versuchsprojektes in einer schwedischen Hütte untersucht(27).

Die zur Boliden AG gehörende Hütte in Rönnskär (Nordschweden) produziert als Hauptprodukte Kupfer und Blei, zusätzlich Zinkoxidklinker und Edelmetalle wie Gold, Silber, Selen und Pt/Pd aus der Schrottaufbereitung. Die Verwertung von Leiterplatten- und Kabelschrott hat in der Hütte seit mehr als 10 Jahren Tradition. Im sogenannten Kaldo-Ofen wird im Schwebelöschverfahren Schwarzkupfer extrahiert, das anschließend zu Reinkupfer raffiniert wird. Metallhaltige Sekundärrohstoffe wie Schlacken, Stäube, Schlämme werden in einem Verblaseofen behandelt. In das geschmolzene Material werden Kohlestaub und vorgewärmte Luft eingeblasen. Das entstehende CO reduziert die in der Schmelze vorhandenen Metalloxide. Zink verdampft dabei, wird aus der Schmelze ausgetrieben und im Gasraum über der Schmelze wieder zu Zinkoxid reoxidiert. Ähnlich wie Zink verhalten sich auch Blei und Arsen. Kupfer und Edelmetalle verbleiben in der Schmelze.

Die im Flugstaub enthaltenen Metalloxide werden im Elektrofilter aus dem Gasstrom abgeschieden und in einem Drehrohr bei 1.200°C unter Zugabe von Koks zur Abtrennung von Halogeniden und teilweise auch von Blei behandelt. Der aus dem Abgas abgeschiedene bleihaltige Staub wird zur Verhüttung weitergegeben. Als Produkt verbleibt ein Zinkoxidklinker mit einem Gehalt von ca. 70%-75% Zinkoxid, der an eine Zinkhütte abgegeben wird. Die Schlacke wird je nach Gehalt an Edelmetallen und Kupfer weiterverarbeitet.

Im Zusammenhang mit der Frage nach der Anwendbarkeit des Verfahrens für die Verwertung von EAG wurden Versuche zum Einsatz zerkleinerter PCs im Verblaseofen durchgeführt und dokumentiert.

Ziel der Versuche:

- Prüfung der grundsätzlichen Anwendbarkeit des Verfahrens für EAG
- Untersuchung zur Rolle der Kunststoffe in den chemischen Prozessen
- Daten zu Auswirkungen auf die Emissionen v.a. auf die Entstehung und die Emissionen von Dioxinen und Furanen
- Daten zu Auswirkungen auf die Qualität der Sekundärmetalle

Versuchsdurchführung:

Die auf Schadstoffe (Hg, PCB) überprüften PCs, wurden in Hammermühlen zerkleinert und anschließend von Eisenmetallen befreit. Diese vorbehandelten Computerabfälle wurden dem normalen Einsatzgut - zinkhaltige Schlacken und Stäube - in einer Menge von 10-20% am Gesamteinsatz beigemischt.

Versuchsergebnisse:

- Die mit den Computerabfällen in den Ofen eingebrachten Kunststoffe wirken überwiegend als Reduktionsmittel, in Form von CO und Wasserstoff. Das kommt auch in einem gegenüber dem Normalbetrieb reduzierten Kohleverbrauch von ca. 1 t/h zum Ausdruck.
- In den aus dem Flugstaub abgeschiedenen Mischoxiden traten deutlich erhöhte Bromidkonzentrationen auf, die im Drehrohr entfernt werden konnten. Die Bromidfracht befindet sich in dem aus dem Drehrohr abgezogenen Abgas, das einer Gasreinigung unterzogen wird.
- Die Qualität des Zinklinkers blieb unverändert: An den wesentlichen Komponenten Zn, Pb, Sn, F und Cl waren keine Veränderungen festzustellen. Die Dioxinkonzentrationen im Endprodukt Zink lagen unter der Nachweisgrenze.
- Eine Analyse der Stoffströme für Halogene, Quecksilber und Antimon ergab, dass die freigesetzten Halogenide in den Gasreinigungsanlagen des Verblaseofens bzw. des Drehrohres abgeschieden werden. Das mit den Computerabfällen in den Ofen eingebrachte Antimon befindet sich zu 65% im Flugstaub, der Rest verbleibt in der Schlacke. Die Abscheidrate für Quecksilber liegt bei 22%.

- Der Einsatz von Computerabfällen beeinflusste weder die Emissionen von Stickoxiden, Schwefeloxiden und Kohlenmonoxid noch waren erhöhte Dioxinmissionen feststellbar.
- Massebilanzen für Dioxine und Furane belegen die Zerstörung der mit dem Einsatzmaterial in den Prozess eingebrachten Dioxine und Furane im Verblaseprozess im Ausmaß von 98% (Tabelle IV-16 bis Tabelle IV-19). Die im Flugstaub verbleibenden Dioxine und Furane werden im Drehrohr abermals einer Temperatur von 1.200 °C ausgesetzt und dabei weitgehend zerstört.

Tabelle IV-16: Input an halogenierten Dioxinen/Furanen in den Verblaseofen

Input	Einsatzmenge t/Charge	Dioxin/Furankonzentration µg/kg	Stofffluss g/Charge
Schlacke (flüssig)	86	0	0
Staub (Lichtbogenofen)	5	30,6	0,15
Computerabfälle	5	1250	6,25
Schlacke (fest)	5	0	0
Summe	101		6,4

Quelle: Plastics recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in non-ferreous metal processes (27)

Tabelle IV-17: Output an halogenierten Dioxinen/Furanen aus dem Verblaseofen

Output	Menge		Dioxine/Furanen		Probe- nahmezeit h	Stofffluss g/Charge
	m ³ /h	t	µg/kg	ng/ m ³		
Abgas	130.000			182	2	0,047
Flugstaub		8,48	6,68			0,057
Summe						0,104

Quelle: Plastics recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in non-ferreous metal processes (27)

Tabelle IV-18: Input an halogenierten Dioxinen/Furanen in den Verblaseofen (TE)

Input	Einsatzmenge t/Charge	2,3,7,8 Dioxine/Furane µg/kg	Stofffluss g/Charge
Schlacke (flüssig)	86	0	0
Staub (Lichtbogenofen)	5	0,95	0,00457
Computerabfälle	5	0,017	0,000086
Schlacke (fest)	5	0	0
Summe	101		0,00483

Quelle: Plastics recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in non-ferreous metal processes (27)

Tabelle IV-19: Output an halogenierten Dioxinen/Furanen aus dem Verblaseofen (TE)

Output	Menge		2,3,7,8-Dioxine/Furane		Probe- nahmezeit	Stofffluss g/Charge
	m ³ /h	t	µg/kg	ng/m ³	h	
Abgas	130.000			2	2	0,00026
Flustaub		8,48	0,078			0,000561
Summe						0,0008

Quelle: Plastics recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in non-ferreous metal processes (27)

Für EAG mit einem hohen Anteil an wertvollen Metallen können metallurgische Recyclingprozesse in Betracht gezogen werden. Die in den Geräten enthaltenen Kunststoffe werden im Rahmen derartiger Verfahren einer rohstofflich/thermischen Verwertung zugeführt.

Die vorgestellte Untersuchung zeigt aber auch deutlich, dass für die praktische Anwendung anlagen- und prozessspezifische Qualitätsanforderungen für das Inputmaterial festzulegen sind, wie z.B. Beschränkungen für bestimmte Inhaltstoffe. Auch zusätzliche Einrichtungen wie z.B. Aktivkohlefilter zur Emissionsminderung sind notwendig.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Verwertungsoption hängt von einer Reihe unternehmens- und anlagenbezogener Faktoren, aber auch regionalen Rahmenbedingungen ab und kann daher kaum allgemeingültig beurteilt werden.

IV.1.4 Thermische Verwertung

IV.1.4.1 Pyrolyse

Aufgrund des hohen Metallgehaltes in Verbindung mit heizwertreichen Kunststoffen kommt für EAG prinzipiell auch eine Pyrolyse als Vorbehandlung für eine nachfolgende Verwertung von Metall- und Kunststoffanteilen in Betracht.

Bereits in den Jahren 1993-1995 wurde in Berlin die Einsatzfähigkeit des sogenannten PYROCOM-Verfahrens für die Behandlung und Verwertung spezieller Abfälle wie Leiterplattenschrott, Kunststoffe aus dem E & E Bereich sowie Shredderleichtfraktionen untersucht. (2)

Das PYROCOM-Verfahren stellt ein Verfahren der gestuften Verbrennung mit den beiden Modulen Pyrolyse und Verbrennung dar. Im Pyrolyseschritt erfolgt die thermische Zersetzung organischer Materialien unter reduzierenden Bedingungen, die im Einsatzgut vorliegende Metalle verbleiben in den festen Pyrolyserückständen, aus denen sie zurückgewonnen werden können. Für die gasförmigen Pyrolyseprodukte sieht das Verfahren eine Nutzung als Heizgas vor.

Die für die Projektdurchführung benutzte halttechnischen Anlage besteht aus einem indirekt (elektrisch) beheizten Drehrohr, in dem bei Temperaturen von 650-850°C die Pyrolyse des Einsatzgutes stattfindet. Das Einsatzgut gelangt über gasdichte Schleusen in das Drehrohr. Die Verweildauer im Drehrohr lässt sich über die Neigung und die Drehzahl variieren und den Erfordernissen des Einsatzgutes anpassen. Um den Lufteintritt in das Drehrohr zu minimieren, werden Eintrag- und Austragzone mit Stickstoff gespült.

Die festen Pyrolyserückstände (Pyrolysekoks) werden je nach Inputmaterial entweder über ein trockenes oder nasses System ausgetragen und für die weitere Verwendung gelagert. Das Pyrolysegas durchläuft eine mehrstufige Gasreinigung, in deren Verlauf Feststoffpartikel, alle bei Raumtemperatur kondensierbaren Kohlenwasserstoffe sowie saure Gase abgeschieden werden. Das gereinigte Pyrolysegas, das nur mehr Permanentgase wie CO, Methan, Ethan, Propan und Wasserstoff enthält, passiert als letzte Stufe einen Aktivkohlefilter. Das Reingas ist als Heizgas geeignet.

Im Rahmen des Projektes wurden unter Einsatz unterschiedlicher Abfallgemische der Pyrolyseprozess, die entstehenden Produkte und ihre Verwertbarkeit eingehend untersucht.

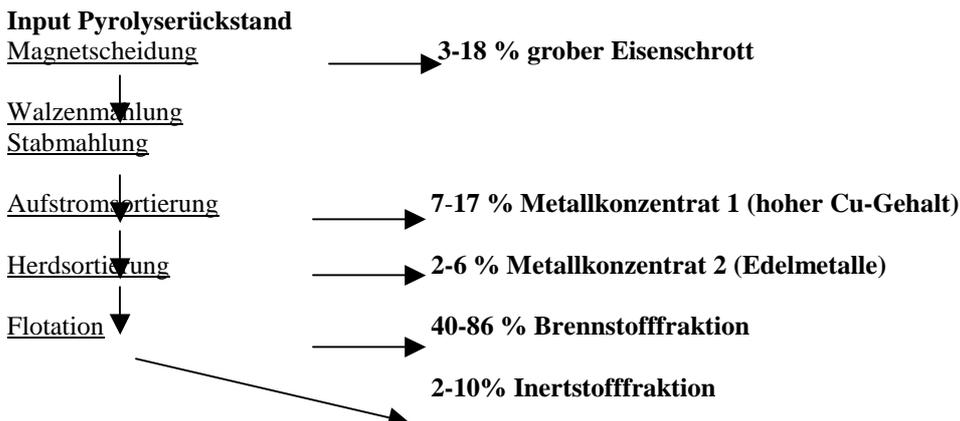
Zusammenfassend kam die Untersuchung zu folgendem Ergebnis:

- Die Pyrolyse ist in der Lage, die eingesetzten Materialien in einen festen Rückstand und ein Pyrolysegas aufzuspalten, wobei der Anteil an festen Rückständen zwischen 25 und 45% und der Gasanteil bei 55-75% liegt. Der Rückstand zeigt nur einen relativ geringen organischen Anteil. In einer nachgeschalteten Pyrolysegasbehandlung können aus dem Pyrolysegas kondensierbare Anteile im Ausmaß von 20-40% als Pyrolyseöl abgeschieden werden.
- Organische Schadstoffe wie PCB und halogenierte Dioxine/Furane werden weitgehend zerstört.
- Die im Elektronikschrott vorliegenden Metalle werden schonend, ohne Oxidation aufgeschlossen.
- Um die Pyrolyseprodukte in eine Form zu bringen, die sie für eine Verwertung geeignet macht, bedarf es aufwendiger Behandlungen.

Verwertungsmöglichkeiten für die Pyrolyseprodukte

Das Pyrolysegas lässt sich nach einer 5 stufigen Gasreinigung (Quencher, 3 Wäscher, Aktivkohlefilter) als Heizgas einsetzen.

Für den festen Rückstand bietet sich die Auftrennung in Metallkonzentrate, in eine kohlenstoffhaltige Brennstofffraktion und in eine deponiefähige Inertstofffraktion an. Je nach Inputmischung der Pyrolyse ergaben sich bei praktischen Versuchen etwa folgende Mengenanteile:



Die Metallkonzentrate sind für den Einsatz in einer Sekundärkupferhütte geeignet. Die Brennstofffraktion ist nur bedingt thermisch nutzbar. Sie zeigt Heizwerte von ca. 25 MJ/kg, allerdings hohe Schwermetallgehalte (Cu, Zn, Blei, Antimon), sodass sie nur in Abfallverbrennungsanlagen zum Einsatz kommen dürfte. Die Inertstofffraktion ist für eine Deponierung geeignet.

Die Aufbereitung der Pyrolyserückstände zur Gewinnung der Metallkonzentrate ist sehr aufwendig und es fallen erhebliche Mengen schlecht verwertbarer Fraktionen an. Als Alternative wurde ein Direkteinsatz des Pyrolyserückstandes in einer Sekundärkupferhütte in Betracht gezogen. Die Realisierbarkeit dieser Vorgangsweise wurde von Hüttenbetreibern bestätigt.

Die Behandlung der Pyrolyseöle war die größte Herausforderung. Der Einsatz in der Petrochemie scheitert an der Elementarzusammensetzung und dem Halogengehalt, ebenso eine Verwendung in der Aufbereitung von Kokereiprodukten. Für das Problem der Halogenabscheidung konnte keine befriedigende Lösung gefunden werden. Der Heizwert von 30-40 MJ/kg macht sie als Stützbrennstoff interessant, der Halogengehalt führt aber dazu, dass sie nur in Anlagen mit entsprechend dimensionierten Rauchgasreinigungsanlagen einsetzbar sind.

Aufgrund der – trotz hohem Behandlungsaufwand - nur beschränkten Verwertbarkeit der Pyrolyseprodukte kam das Projektteam zum Schluss, dass das PYROCOM-Verfahren mit angeschlossener Produktaufbereitung zwar technisch realisierbar, aber für sich alleine als Behandlungsverfahren für E & E Abfälle ökonomisch nicht vertretbar ist.

Im Verbund mit einer Sekundärkupferhütte kann die Pyrolyse als wirksame Vorbehandlung zur Reduktion des organischen Anteils im Einsatzmaterials und zum Abbau organischer Schadstoffe vom Typ Dioxine/Furane dienen. Der Pyrolyserückstand kann ohne Aufbereitung dem Schachtofen zugeführt werden, während das gereinigte Pyrolysegas für die Beheizung des Konverters einsetzbar ist.

1998 wurden im Auftrag der BASF AG in der PYROCOM-Pilotanlage der BC-Consult abermals Versuche zur Behandlung von Abfallfraktionen aus EAG gefahren. Ein von der APME 1999 publizierter Versuchsbericht (6,7) fasst die Versuchsbedingungen und die Ergebnisse zusammen.

Als Input für das Testprogramm standen Altgeräte aus dem industriellen Anwendungsbereich zur Verfügung. Die Altgeräte wurden durch manuelle Demontage von Schadstoffen und leicht entnehmbaren Metallteilen befreit, und in folgende Fraktionen aufgeteilt:

- Kunststoff/Metall-Gemisch
- Eisenteile
- Kupfer
- Aluminium
- Kathodenstrahlröhren, Schadstoffe
- Reststoffe zur Entsorgung

Ein Teil des Kunststoff/Metall Gemisches wurde ohne vorherige Metallabtrennung lediglich einer Grobzerkleinerung zugeführt. Ein zweiter Teil passierte die für Kabelabfälle übliche Aufbereitung. Die aus der Kabelbehandlung anfallende kunststoffreiche Feinfraktion und die metallreiche Grobfraktion wurden für die Pyrolyseversuche eingesetzt. Die Feinfraktion enthielt noch einen Metallanteil von ca. 10%, der durch Optimierungen in der Aufbereitung noch zu reduzieren wäre.

Tabelle IV-20: Zusammensetzung des Einsatzmaterials

Test	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5
Fraktion	Grobfraktion	Feinfraktion	Feinfraktion	Grobfraktion	Grobfraktion
Heizwert (MJ/kg)	7,96	17,3	k.A.	8,95	9,80
Asche (%)	71	41	37	67	71
Metalle (%)	60	7	13,5	49	42
Inertmaterial (%)	11	34	23,5	18	28
Kunststoff (%)	29	59	63	33	29
Halogene (%)	0,85	2,67	2,4	1,36	2,52
Chlor (%)	0,39	1,7	0,6	0,43	1,47
Brom (%)	0,46	0,97	1,8	0,93	1,05

Quelle: Recovery of Waste Electric & Electronic Equipment from Industrial Appliances by Pyrolysis (7)

Tabelle IV-21: Verteilung der Pyrolyseprodukte

Test	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5
Fraktion	Grobfraction	Feinfraktion	Feinfraktion	Grobfraction	Grobfraction
Pyrolysetemp. (°C)	850	750	850	750	750
Fester Rückstand (%)	72,8	43,1	43,5	74,5	77,1
Pyrolyseöl (%)	11,8	18,9	17,7	9,9	5,2
Pyrolysegas (%)	11,5	27,4	26,9	13,5	16,1
Nebenprodukte (%)	3,9	10,6	11,0	2,1	1,5

Quelle: Recovery of Waste Electric & Electronic Equipment from Industrial Appliances by Pyrolysis (7)

Die Verteilung der Pyrolyseprodukte wird primär von der Zusammensetzung des Einsatzgutes bestimmt, die Pyrolysetemperatur hat wenig Einfluss. Der hohe Kunststoffgehalt der Feinfraktion führt zu höheren Öl- und Gasausbeuten und damit auch zu höheren Reststoffmengen aus der Gasaufbereitung.

Von besonderem Interesse ist die Verteilung der mit dem Inputmaterial eingebrachten Schadstoffe wie Halogene und Schwermetalle. Die gefundene Verteilung entsprach den Erwartungen aus den Grundlagenuntersuchungen des Forschungsprojektes. Das im Quencher benutzte Medium und das Austragsystem für den Pyrolyserückstand üben einen entschiedenen Einfluss darauf aus, in welchen Produktfraktionen die Halogene zu finden sind. Wird der Quencher mit Öl betrieben finden sich die Halogene bevorzugt im Quenchrückstand und im Pyrolyseöl. Bei Verwendung von Wasser finden sich die Halogene als Salze in den Neutralisationsrückständen der Wasseraufbereitung. Beim Nassaustrag des Pyrolyserückstandes werden die meist anorganisch gebundenen Halogene ausgelaugt und finden sich letztlich in den Neutralisationsrückständen.

Tabelle IV-22: Zusammensetzung des Pyrolyserückstandes

Test	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5
Fraktion	Grobfraction	Feinfraktion	Feinfraktion	Grobfraction	Grobfraction
Heizwert MJ/kg	3,2	8,5		1,8	3,1
Asche (%)	83,8	78,0	78,0	90,4	90,3
Metalle (%)	n.b.	35,00	27,5	72,3	63,4
Chlor (%)	n.b.	1,34	0,25	0,22	0,48
Brom (%)	n.b.	2,1	0,69	0,17	0,36

Quelle: Recovery of Waste Electric & Electronic Equipment from Industrial Appliances by Pyrolysis (7)

Der Metallgehalt der Grobfraction begünstigt die Wärmeübertragung im Einsatzgut und fördert die Zersetzung des organischen Materials. Der Pyrolyserückstand der metallreichen Grobfraction zeigt einen deutlich niedrigeren Heizwert und ist aufgrund seines hohen Metallgehaltes als Rohstoff in Sekundärmetallhütten einsetzbar. Ein nasses Austragsystem reduziert den Halogengehalt des Rückstandes.

Die Pyrolyseöle zeigen eine komplexe Zusammensetzung mit einem hohen Aromatenanteil. Insgesamt konnten 35 Komponenten identifiziert werden. Problematisch ist ihr hoher Halogengehalt. Hinsichtlich der Verwertbarkeit der Pyrolyseöle kommt auch diese Untersuchung zum Ergebnis, dass vorzugsweise eine Verbrennung in Anlagen mit ausreichend dimensionierten Rauchgasreinigungseinrichtungen in Frage kommt. Ein Einsatz als Quenchöl oder eine Flugstromvergasung sind zumindest denkbar.

Das gereinigte Pyrolysegas enthielt Wasserstoff, CO und CO₂, sowie gasförmige Kohlenwasserstoffe wie Ethan/Ethen, Propan/Propen. Der Heizwert lag mit ca. 30 MJ/m³ bei rund 80 % des Heizwertes von Erdgas.

Die Ergebnisse zur technischen Machbarkeit des untersuchten Verwertungsweges wurden durch eine Kostenkalkulation für den Bau und den Betrieb einer technischen Anlage ergänzt. Die Kalkulation der Investitionskosten beinhaltet die Kosten für die Errichtung der Gesamtanlage inklusive Planung und Montage. Die Betriebskosten berücksichtigen Betriebsmittel, Personalkosten, Wartung, Instandhaltung, Entsorgungskosten und Produkterlöse. Die Behandlungskosten berücksichtigen zusätzlich eine jährliche Abschreibung in der Höhe von 10% und 10% Kapitalzinsen.

Variante 1: Konventionelle Aufbereitung, Vermarktung der Metallkonzentrate, Deponierung der Reststoffe.

Anlageparameter:

Durchsatz:	1t/h
Anlagenbetrieb:	5 Tage /Woche (2 Schichtbetrieb)
Anlagenkapazität:	3.600 t/a
Investitionskosten:	7 Millionen DM (€3,56 Millionen)
Betriebskosten:	405 DM/t (€206/t)
Behandlungskosten:	795 DM/t (€404/t)

Variante 2: Vorsortierung und Schadstoffentfrachtung, Grobzerkleinerung, Pyrolyse, Pyrolyserückstand an Sekundärkupferhütte, Pyrolyseöl und -gas decken den anlageninternen Energiebedarf.

Anlageparameter:

Durchsatz:	1t/h
Anlagenbetrieb:	7 Tage /Woche (3 Schichtbetrieb)
Anlagenkapazität:	7.000 t/a
Investitionskosten:	15,2 Millionen DM (€7,7 Millionen)
Betriebskosten:	498 DM/t (€253/t)
Behandlungskosten:	889 DM/t (€452/t)

Bei einer Erhöhung der Anlagenkapazität auf 10.000 bzw. 20.000 t/a reduzieren sich die spezifischen Betriebs- und Behandlungskosten auf 381/685 DM/t für Variante 1 und 283/482 DM/t für Variante 2 (194/348 €/t bzw. 144/245 €/t).

Die Behandlungskosten der beiden Verwertungsvarianten bewegen sich unter Berücksichtigung von Schätzungenauigkeiten in vergleichbaren Größenordnungen. Von Seiten der Projektdurchführung (BC-Consult Berlin) geht man aber davon aus, dass die Aufbereitungsvariante Pyrolyse überhaupt erst ab einer Anlagenkapazität von mind. 10.000 t/a und einem stündlichen Durchsatz von 2 t wirtschaftlich zu betreiben ist und nur im räumlichen Verbund mit einer Sekundärkupferhütte. Die notwendigen Investitionskosten für die beteiligte Hütte sind hoch und die zu erwartende Amortisationszeit ist mit angenommenen 10 Jahren sehr lang.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Aufbereitungsvariante Pyrolyse daher nur sehr bedingt ökonomisch attraktiv und die Realisierungschancen für diese Verwertungsvariante sind als gering einzustufen.

Inwieweit eine gesetzliche Regelung zur Verwertung von EAG die entsprechenden ökonomischen Rahmenbedingungen ändert bleibt noch abzuwarten.

IV.1.4.2 Verbrennung

Der Heizwert der im E & E-Bereich verwendeten Kunststoffe liegt im Durchschnitt niedriger als im Verpackungsbereich, was auf den deutlich geringeren Polyolefinanteil zurückzuführen ist und auch mineralische Füllstoffe verringern den Heizwert.

Die als Flammenschutzmittel eingesetzten halogenierten organischen Verbindungen und thermisch flüchtige Schwermetalle wie z.B. Cadmium stellen auch im Hinblick auf eine Verbrennung kritische Komponenten in Kunststoffen aus EAG dar - besonders für industrielle Verbrennungsanlagen. Auch beim Einsatz in Abfallverbrennungsanlagen ist ihnen Aufmerksamkeit zu schenken. Tabelle IV-23 und zeigen den Schwermetall-, Halogen- und Flammenschutzmittelgehalt von Kunststoffgemischen, die aus verschiedenen EAG-Quellen gewonnen wurden.

Tabelle IV-23: Schwermetalle und Halogene in Kunststoffen aus EAG

Quelle: Vehlow, Mark: Electrical and electronic plastic waste co-combustion (39)

Herkunft	Kunststoffe aus EAG			
	Haushalt	Gewerbe	Industrie	Neugeräte
P (mg/kg)	250	2600	8100	1200
Cl (mg/kg)	3895	10990	1865	38550
Br (mg/kg)	4290	15000	5750	8600
Zn (mg/kg)	620	1540	4720	292
Cu (mg/kg)	1900	82	77500	137
Cd (mg/kg)	240	123	29	41
Sn (mg/kg)	85	63	1230	18
Sb (mg/kg)	2000	1950	2200	2630
Pb (mg/kg)	146	96	1890	1890

Tabelle IV-24: Flammschutzmittelkonzentration in Kunststoffen aus EAG

Flammhemmer	Kunststoffe aus EAG					
	Haushalt		Gewerbe		Industrie	
PBB (mg/kg)	< NG		< NG		< NG	
PBDPE (mg/kg)	140 _± 50	45	18.800 _± 1600	10.500	490 _± 30	410
TBBA (mg/kg)	1.400 _± 80	1200	5.600 _± 700	6.000	100 _± 35	140

PBB = polybromierte Biphenyle; PBDPE = polybromierte Diphenylether; TBBA = Tetrabrom-Bisphenol A

Die in Tabelle IV-23 und Tabelle IV-24 dargestellten Fraktionen Haushalt, Gewerbe und Industrie stammen aus in Deutschland in den jeweiligen Bereichen gesammelten EAG und wurden mit Ausnahme der Industriefraktion durch manuelle Demontage gewonnen. Die als „Neuware“ bezeichnete Fraktion wurde künstlich hergestellt und entspricht dem heute in Elektro- und Elektronikgeräten eingesetzten Kunststoff-Mix.

Tabelle IV-25: Aktuelle Kunststoffanteile im E & E Bereich

Kunststoff	Anteil im E & E Bereich (%)	Kunststoff	Anteil im E & E Bereich (%)
PS	29	PU	6
ABS	16	PPO	3
PP	11	PMMA	2
PA	8	POM	1
PVC	8	Epoxide	2
PC	7	Silikone	1
PET/PBT	6		

Quelle: APME, VKE

In Fernsehgehäusen, die im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Universität Erlangen hinsichtlich ihres Brom- und Antimongehaltes untersucht wurden (30, 11), wurden für beide Elemente deutlich höhere Konzentrationen gefunden als in den in Tabelle IV-23 und Tabelle IV-24 dargestellten Abfällen: Bromkonzentrationen von 3-17% und Antimonkonzentrationen von 1-3% gegenüber Werten von 0,4 bis 1,5 % für Brom 0,2% für Antimon.

Diese großen Unterschiede sind sicherlich zum Teil darauf zurückzuführen, dass in Erlangen ausschließlich Fernseh- und Monitorgehäuse untersucht wurden, die zu einem überdurchschnittlich hohen Prozentsatz mit Flammenschutzmitteln ausgerüstet sind. Darüber hinaus zeigen diese Diskrepanzen aber deutlich, dass Kunststoffe aus EAG auch bei ihrer thermischen Verwertung differenziert zu sehen sind.

IV.1.4.3 Verbrennung in Abfallverbrennungsanlagen

Bei Abfallverbrennungsanlagen, die dem Stand der Technik hinsichtlich Feuerungstechnik, Abgasreinigung und Reststoffbehandlung entsprechen, ist davon auszugehen, dass die Verwertung aller Kunststoffe aus EAG ohne nachteilige Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess und die Umwelt erfolgen kann – auch jener Fraktionen die sich durch erhöhte Schwermetall- und Halogenkonzentrationen sowie nicht auszuschließende Gehalte an halogenierten Dioxinen und Furanen auszeichnen.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen eines Versuchsprojektes die Auswirkungen der Mitverbrennung von Kunststoffen aus EAG in Abfallverbrennungsanlagen gezielt untersucht und dokumentiert (39, 40). Gegenstand der Untersuchungen waren:

- Das Verhalten der mit den Kunststoffen eingetragenen Schwermetalle
- Der thermische Abbau der bromierten Flammschutzmittel
- Das Verhalten der aus den Flammhemmern stammenden Elemente Cl und Br
- Auswirkungen der hohen Br-Einträge auf Dioxine/Furane im Abgas.

Am Forschungszentrum Karlsruhe steht eine Pilotanlage zur Hausmüllverbrennung zur Verfügung. Die Anlage verfügt über einen Vorschubrost, ist für einen Feststoffdurchsatz von 200-250 kg/h geeignet und ist mit einer 2 stufigen nassen Rauchgasreinigung ausgestattet. Die Testanlage verfügt über die für die Überwachung und Dokumentation des Verbrennungsvorganges sowie der Abgas- und Reststoffströme innerhalb der Anlage notwendigen Datenerfassungs-, Mess- und Analyseinrichtungen.

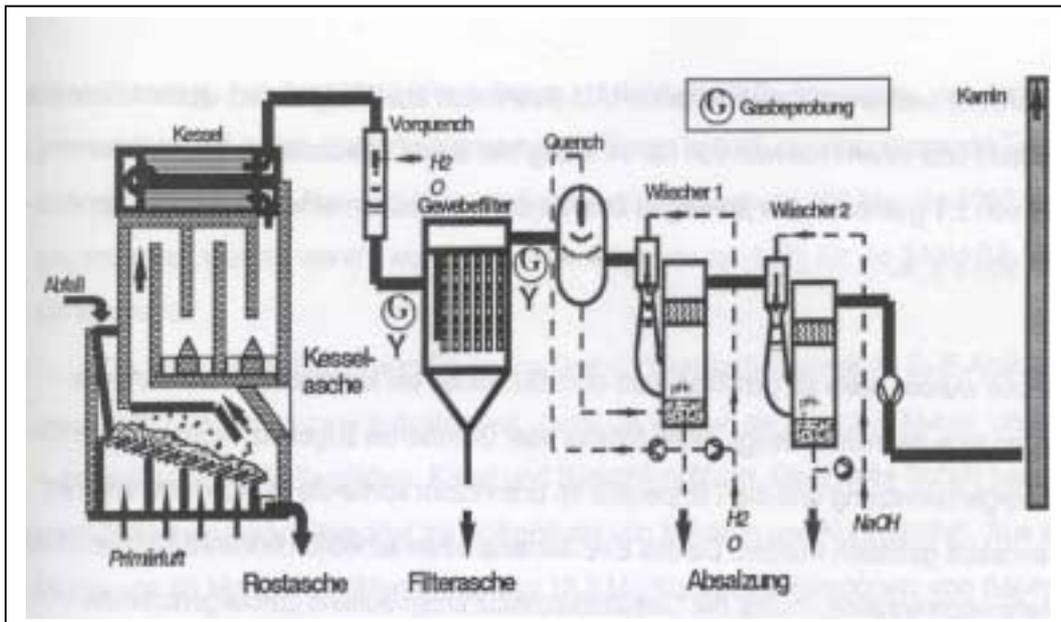


Abb. IV-11: Schema der Pilotanlage zur Hausmüllverbrennung (39)

Das Testprogramm erstreckte sich über zwei Wochen. Am jeweils ersten und letzten Tag wurde ohne Zugabe der Probefraktionen der Vergleichszustand aufgenommen. Die beiden Versuchsreihen unterschieden sich in der Einrichtung des Brennraums: In der ersten Reihe Gleichstrombetrieb, in der zweiten Mittelstrombetrieb. Als Kunststoffproben dienten die in Tabelle IV-23 vorgestellten Fraktionen, die im Ausmaß von 3-12% dem normalen Anlageninput – einer Mischung aus geshreddertem Hausmüll mit geringem Kunststoff- und Papieranteil und pelletiertem BRAM, der einen hohen Papieranteil aufweist – zugegeben wurde. Einige Ergebnisse der Versuche zeigt Tabelle IV-26.

Tabelle IV-26: Zusatz von Kunststoffen aus EAG in einer Abfallverbrennungsanlage

	Br-Eintrag Mg/kg	Heizwert MJ/kg	°C Brenn- raum	O ₂ im Rohgas	CO im Rohgas	HCl im Rohgas	HBr im Rohgas
Vergleich 1.1	59	6,77	918	9,4	1,7	760	3

Vergleich 1.2	67	6,97	894	9,7	1,2	730	3
Haushalt 3%	270	7,95	900	9,9	1,7	680	9
Gewerbe 3%	1979	7,91	912	9,9	2,1	900	204
Industrie 3%	606	7,96	901	10,0	1,7	840	72
Industrie 6%	1193	8,48	893	10,4	3,6	850	131
Vergleich 2.1	68	7,44	892	9,9	1,2	750	3
Vergleich 2.2.	71	7,17	906	9,4	1,1	770	4
Vergleich 3.1	57	8,88	930	10,0	0	790	4
Vergleich 3..2	45	8,77	912	10,3	0,1	760	3
Neumaterial 6%	757	10,58	923	10,5	1,8	870	63
Neumaterial 12%	1650	12,44	949	10,5	0	1010	119
Gewerbe 6%	1297	10,26	926	10,5	0,1	860	157
Gewerbe 12%	2735	12,76	937	10,9	0,2	940	292
Industrie 12%	1000	10,84	932	10,6	0,3	800	141
Vergleich 4.1	38	8,84	939	9,9	0,3	670	4

Quelle: Vehlow, Mark: Electrical and electronic plastic waste co-combustion (39.40)

Die durch die Kunststoffzugabe eintretende deutliche Erhöhung des Heizwertes zeigte keine nachteiligen Auswirkungen auf die Verbrennung. Die Temperatur im Brennraum, der Sauerstoff- und Kohlenmonoxidgehalt im Rohgas blieben relativ konstant. Der Ausbrand im Bettgut wurde positiv beeinflusst, was in einer Reduktion der TOC-Werte der Rostaschen deutlich wurde.

Durch die Kunststoffzugabe kam es zu deutlichen Erhöhungen des Eintrags von Br sowie der Metalle Cu, Sb, Zn und Pb. Beim Zusatz der „Neuwarenfraction“ wurde eine Erhöhung des Chloreintrages beobachtet. Untersuchungen zur Verteilung dieser Komponenten auf die Reststoffströme und die Bildung von Dioxinen und Furanen ergaben:

- Chlor und Brom finden sich zu 70 - 80% als Halogenwasserstoffe im Rohgas.
- Die Verteilung der Schwermetalle auf die Reststofffraktionen bleibt von der Kunststoffzugabe unbeeinflusst: Das Verhalten der Schwermetalle ändert sich auch durch hohe Einträge einzelner Elemente nicht entscheidend, die Absolutkonzentrationen in den Reststofffraktionen steigen in Abhängigkeit vom Input im erwarteten Ausmaß.
- Es war keine Korrelation von Br-Eintrag und Gesamtkonzentrationen an polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen im Rohgas feststellbar. Gefunden wurde ein Zusammenhang zwischen Bromeintrag und dem Auftreten von mono- und dibromierten Dioxinen und Furanen im Rohgas.
- Die Summe aller halogenierten Dibenzodioxine und -furane im Rohgas blieb trotz steigendem Br-Einsatz annähernd konstant und lag im Normalbereich der Testanlage von 20-120ng/m³. Beeinflusst vom Br-Eintrag wurde die Verteilung zwischen chlorierten, bromierten und gemischthalogenierten Dioxinen und Furanen.
- Die Dioxinmissionen im Reingas nach einem Aktivkohleabsorber lagen unter 0,001 ng (TE)/m³.

Eine vorsichtige Abschätzung über das Verhalten der bromierten Flammschutzmittel ergab einen Zerstörungsgrad von > 99,90%: Die mit den Kunststoffabfällen eingetragenen Verbindungen PBB und PBDPE konnten im Rohgas bei einer Nachweisgrenze von 20 ng/m³ bzw. 50 ng/m³ nicht nachgewiesen werden, polybromierte Benzole wurden in einer Konzentration von 20 ng/m³ erfasst. Selbst unter der Annahme, dass PBB und PBDPE im Ausmaß der Nachweisgrenze im Rohgas vorliegen, beträgt die Konzentration an Produkten aus der unvollständigen Zersetzung der bromierten Flammschutzmittel max. 100 ng/m³ Rohgas bzw. 500 ng/kg Brennstoff (5 m³ Rohgasstrom/kg Brennstoff). Bei einem Eintrag an Flammschutzmitteln von bis zu 200 g/h, und einem stündlichen Durchsatz von 160 kg entspricht das einer Zerstörungsrate von > 99,90%.

Die Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen stellt an die zu verwertenden Kunststoffe die geringsten „Qualitätsanforderungen“ wie Asche-, Halogen-, Schwefel-, Schwermetall- und organischen Schadstoffgehalt und stellt sowohl für Schwermetalle als auch organische Schadstoffe nachweislich eine Senke dar, sodass über diesen Verwertungsweg ein gezieltes Ausschleusen dieser umweltkritischen Stoffe aus Produktions- und Produktkreisläufen gewährleistet werden kann.

Die Kosten für die thermische Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen unterliegen starken regionalen Schwankungen. Sie werden stark von der Auslastung der verfügbaren Anlagenkapazitäten beeinflusst und den im Vorfeld von gesetzlichen Regelungen zur Beschränkung der Abfalldeponierung (Deponieverordnung in Österreich, 2005 in Deutschland) extrem niedrigen Deponiepreisen. In Österreich liegen die Kosten derzeit zwischen 1.200 und 2.800 ATS/t (87 und 203 €/t) in Deutschland zwischen 100 und 800 DM/t (50 bis 407 €/t) (Extremwert: MVA Augsburg).

IV.1.4.4 Einsatz in industriellen Feuerungsanlagen

Für den Bereich der Mitverbrennung in industriellen Feuerungsanlagen existieren Brennstoffanforderungen, die von der technischen Konzeption der jeweiligen Anlage und den vorhandenen Rauchgasreinigungs- und Reststoffaufbereitungsanlagen bestimmt werden. Inwieweit diese Anforderungen von Kunststoffen aus EAG erfüllt werden können, ist im Einzelfall zu prüfen.

Ähnlich wie im Fall der stofflichen Verwertung ist für eine Verwertung von Kunststoffen aus EAG die Definition verschiedener Kategorien von Ersatzbrennstoffen vorstellbar, deren Qualitätsanforderungen in Analogie zur stofflichen Verwertung vom Verwerter vorzugeben sind.

So sind die geltenden Anforderungen für den Einsatz von Verpackungskunststoffen als Zusatzbrennstoffe in Zementöfen von „gemischten“ Kunststoffen aus EAG wahrscheinlich nicht einhaltbar. Es ist allerdings durchaus vorstellbar aus bestimmten Gerätegruppen Kunststoffe zu extrahieren, die diesen Auswahlkriterien entsprechen.

Ein ähnliches Vorgehen könnte auch für andere industrielle Feuerungsanlagen die Frage klären, inwieweit es gelingt, aus EAG passende Ersatz- bzw. Zusatzbrennstoffe zu extrahieren, und wenn ja ob die in Frage kommenden Abfallströme in ausreichender Menge und zu ökonomisch vertretbaren Bedingungen zur Verfügung stehen.

V. KUNSTSTOFFVERWERTUNG AUS EAG IN ÖSTERREICH

V.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

V.1.1 Österreich

V.1.1.1 Deponieverordnung

Die seit 1.1.1997 für Neuanlagen in Kraft befindliche Deponieverordnung (Verordnung über die Ablagerung von Abfällen) untersagt im § 5 die Ablagerung von Abfällen, deren Gehalt an organischem Kohlenstoff 5% übersteigt bzw. deren Heizwert 6000 KJ/kg übersteigt. Mit Ablauf der in der Novelle zum Wasserrechtsgesetz 1997 festgelegten Übergangsfrist für die Anpassung bestehender Deponien an die Anforderungen der Deponieverordnung am 1.1.2004, sind sämtliche Abfälle - so sie nicht einer stofflichen Verwertung zugeführt werden bzw. werden können - einer thermischen oder mechanisch-biologischen Behandlung zuzuführen. Spätestens ab diesem Zeitpunkt steht die derzeit verbreitet genutzte Entsorgungsvariante Deponierung für Kunststoffe grundsätzlich nicht mehr zur Verfügung.

V.1.1.2 Richtlinie zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten

Auf der Basis der ÖNORM S 2106 und unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Pilotprojekten zur Sammlung und Behandlung von EAG wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie eine „Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ herausgegeben.

Die Richtlinie orientiert sich wesentlich an der ÖNORM S 2106 und enthält für die Behandlung von Kunststoffen folgende Empfehlung: stoffliche Verwertung und thermische Behandlung bzw. Verwertung. Im Detail wird darauf verwiesen, dass eine stoffliche Verwertung von mit halogenhaltigen Flammschutzmittel und/oder schwermetallhaltigen Zusätzen versehenen Kunststoffen nicht erwünscht ist und eine thermische Verwertung bzw. Behandlung in entsprechend ausgerüsteten Anlagen zu erfolgen hat.

V.1.1.3 Bundesabfallwirtschaftsplan

Inhaltlich findet sich die „Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten“ auch im Teil II des Bundesabfallwirtschaftsplans 1998 unter dem Punkt „Behandlungsgrundsätze für bestimmte Abfall- und Stoffströme“: Empfohlene Entsorgungswege für Elektroaltgeräte.

V.1.2 Europäische Union

V.1.2.1 Richtlinie zur Sammlung und Behandlung von EAG

Im Juni 2000 wurden von der Europäischen Kommission der Entwurf zu einer *Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte* und der Entwurf zu einer *Richtlinie zur Begrenzung gefährlicher Inhaltsstoffe in Elektro- und Elektronikgeräten* angenommen und dem Europäischen Parlament und dem Europäischen Rat zur Behandlung zugeleitet.

Die Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte sieht verpflichtend Maßnahmen zur getrennten Sammlung von EAG vor und beinhaltet Vorgaben für die Behandlung. Gemäß dem Richtlinienentwurf sind die anfallenden EAG insgesamt 10 verschiedenen Gerätegruppen zuzuordnen, wobei für jede der Gerätegruppen spezifische Verwertungsquoten zu erreichen sind. Zusätzlich zu einer Gesamtverwertungsquote, die je nach Gerätegruppe zwischen 60 und 80 % des Gerätegewichtes liegt, sind auch Mindestquoten für die Wiederverwendung und das Recycling von Bauteilen, Materialien und Substanzen festgelegt, wobei der Begriff Recycling die thermische Verwertung dezidiert ausschließt. Diese Quote liegt je nach Gerätegruppe zwischen 5 und 10 % unter der Gesamtverwertungsquote, konkret zwischen 50 und 75% des Gerätegewichtes. (Ausnahme: Für Gasentladungslampen ist nur eine Gesamtverwertungsquote vorgesehen).

Geht man vom aktuell in EAG anzutreffenden Material-Mix aus, so wären die Mindestquoten für die stoffliche Verwertung mit wenigen Ausnahmen wie z.B. Kühlgeräten und Haushaltskleingeräten, zum gegenwärtigen Zeitpunkt wahrscheinlich noch ohne eine stoffliche Verwertung von Kunststoffanteilen erreichbar.

Die generelle Zunahme des Kunststoffeinsatzes in Elektrogeräten, auch in jenen Bereichen, für die bisher sehr geringe Kunststoffanteile charakteristisch sind, wie z.B. große Haushaltsgeräte, führt mittelfristig dazu,

dass der Aufbau entsprechender Strukturen für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG notwendig ist.

V.2 Verfügbare Mengen

Wie im Kapitel II.1 bereits dargestellt, wird das auf der Basis verschiedener Informationen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Abfallwirtschaft abgeschätzte aktuelle Potenzial an Elektroaltgeräten in Österreich mit 100 - 120.000 t/Jahr beziffert, wobei man davon ausgeht, dass etwa 55 - 60% des Abfallpotenzials im Bereich der privaten Haushalte liegt.

Das Kunststoffpotenzial in EAG wird im Mittel mit 20% angenommen. Die Bandbreite des Kunststoffanteils reicht allerdings je nach Gerätegruppe von 5 – 50%, in einzelnen Geräten erreichen Kunststoffe einen Gewichtsanteil von 80%.

Tabelle V-1: Kunststoffanteile in verschiedenen Gerätegruppen

Gerätegruppe	Kunststoffanteil
Haushaltsgeräte groß	20-25%
Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler	10-15%
Kühlschränke, Gefriergeräte	35-50%
Bildschirmgeräte (TV, Monitore)	20-25%
IT, Bürotechnik (Kopierer, Drucker, PCs)	10-12%
Telekommunikation	60%
Telefone	70-80%
Fax, Anrufbeantworter	80%
Modem	30%
Öffentliche Telefonautomaten	15%
Unterhaltungselektronik	25-30%
Audio, Radios usw.	30-40%
Videorecorder	30%
Videokamera	15-20%
Haushaltsgeräte klein	35%
Staubsauger, Bügeleisen, Friteusen	40-50%
Toaster, Kaffeemaschinen, Mixer,	20%
Elektrotechnische Anlagen	7%
Medizintechnik	3%

Quelle (37)

Im Hinblick auf eine stoffliche Verwertung von Kunststoffen ist die Abschätzung möglicher sortenreiner Kunststoffströme in Abhängigkeit von Gerätegruppen von entscheidender Bedeutung. Trotz der Vielfalt der in Elektrogeräten eingesetzten Kunststoffe gibt es geräte- und funktionsspezifische Einsatzschwerpunkte für bestimmte Kunststoffe. Darüber hinaus ist auch der zu erwartende Gehalt an kritischen Inhaltsstoffen in hohem Maße vom Gerät und seinem Einsatzbereich abhängig. Neben Sortenreinheit und möglichst geringer Schadstoffbelastung spielt auch die verfügbare Menge eine entscheidende Rolle für die Realisierbarkeit einer stofflichen Verwertung.

Der Versuch einer derartigen „Kunststoffstromabschätzung“ ist im folgenden dargestellt. Die Basis für die Abschätzung bilden:

- Abschätzungen über das EAG-Potenzial gegliedert nach Geräten
- Informationen aus der Kunststoffindustrie und von Geräteherstellern hinsichtlich der Art, der Mengen und den bevorzugten Einsatzgebieten für bestimmte Kunststoffe
- Die in verschiedenen praktischen Demontageversuchen und Pilotprojekten gewonnenen Erfahrungen über Gerätegewichte und Kunststoffanteile.

Die Abschätzung des EAG-Potenzials gegliedert nach Geräten wurde zunächst auf Basis des Ausstattungsgrades der 3 266.000 österreichischen Haushalte mit Elektrogeräten und einer mittleren Nutzungsdauer vorgenommen. Für jene Bereiche, für die keine Daten zum Ausstattungsgrad vorliegen, wie beispielsweise Kleingeräte (Staubsauger, Haarfön, Bügeleisen u.ä.) wurde das Altgerätepotenzial über den Absatz neuer Geräte berechnet unter der Annahme, dass der Neukauf zu einem bestimmten Prozentsatz dem Ersatz eines Altgerätes dient. Diese Abschätzung wurde zusätzlich auch für jene Geräte durchgeführt, für die nur veraltete Angaben hinsichtlich des Ausstattungsgrades österreichischer Haushalte verfügbar sind. Dies trifft z.B. auf große Haushaltsgeräte zu (Erhebungsdatum 1993). Die Ersatzquoten wurden nach Rücksprache mit Statistik Austria geschätzt.

Tabelle V-2: Geschätztes Aufkommen ausgewählter EAG (Ausstattungsgrad Haushalte 1998)

	Ausstattungsgrad (%)	Lebensdauer (a)	Altgeräte (1000 Stk.)	Grätegewicht (kg)	Altgeräte (t)
TV-Geräte	96,7	10	316	25-30	8.690
Videorecorder	62,8	8	256	3	768
Audioanlagen	64	8	261	3-5	1.044
PC	24	7	112	10-15	1.400
Monitore	24	7	112	20-25	2.520
Videokameras	16	5	104	2	208

Quelle: Statistik Austria, Projekt EAG Sammlung Flachgau (Gerätsgewichte) (34, 36)

Tabelle V-3: Geschätztes Aufkommen an EAG aus dem privaten Sektor (Basis Konsum 1999)

Geräteart	Verkaufte Menge (1000 Stk.)	Ersatzquote (%)	Altgeräte (1000 Stk.)	Geräte-gewicht (kg)	Altgeräte (t)
Waschmaschinen	227	90	204	50	10.200
Herde	150	90	135	40-50	6.075
Wäschetrockner	47	50	25	30	750
Geschirrspüler	155	60	93	30	2.790
Kühlschränke	253	95	240	30-40	8.400
Gefriergeräte	130	90	117	30-40	4.095
Mikrowellenherde	192	60	115	10-20	1.725
TV-Geräte	512	70	358	25-30	9.845
Videorecorder	312	70	218	5-8	1.417
Audioanlagen	284	70	200	3-5	800
Radiorecorder	344	70	240	2	480

Portables	310	80	248	1-2	373
Autoradios	380	80	304	1-2	456
Videokameras	80	50	40	2	80
Staubsauger	478	95	450	5-7	2.700
Kaffeemaschinen	551	95	520	1,5	780
Wasserkocher	266	70	186	0,5-1	140
Toaster	118	95	112	1,5	168
Küchengeräte	424	90	382	1,5	573
Bügeleisen	415	95	395	1-2	592
Fön, Hairstyling u.ä.	474	95	450	0,5-1	337
Frittiergeräte	97	80	77	2-4	231
Rasierer	303	95	287	0,2-0,4	86
Mundhygiene	240	70	168	0,5	84
Summe	7.742		6.564		53886

Quellen: Fessel-GfK: Marktvolumen Elektrogeräte1999; Statistik Austria; Projekt EAG Sammlung Flachgau

Tabelle V-4: Geschätztes Aufkommen an Altgeräten aus dem Bereich Bürotechnik (Konsum 2000)

Geräteart	Verkaufte Menge (1000 Stk.)	Ersatzquote (%)	Altgeräte (1000 Stk.)	Geräte- gewicht (kg)	Altgeräte (t)
PC	471	30	141	10-15	1762
Monitore	432	30	130	20-25	2925
Drucker	445	30	133	5-8	865

Tabelle V-5: Kunststoffmengen in verschiedenen EAG aus dem privaten Sektor

Geräteart	Altgeräte (t)	Kunststoffanteil (%)	Potentielle Kunststoffmenge (t)
Kühlschränke*	8.400	35-50	3.528
Gefriergeräte*	4.095	35-50	1.720
Zwischensumme 1	12.495		5.248
Waschmaschinen	10.200	10-15	1.225
Herde	6.075	10-15	760
Wäschetrockner	750	10-15	94
Geschirrspüler	2.790	10-15	349
Zwischensumme 2	19.815		2.428
TV-Geräte	9845	20	1.969
Monitore	2.925	20-25	658
Zwischensumme 3	12.770		2.627
Videorecorder	1.417	30	425
Audioanlagen	800	30-40	289
Radiorecorder	480	30-40	168
Portables	373	30-40	130
Autoradios	456	?	0
Videokameras	80	15-20	14
Zwischensumme 4	3.606		1.026
Staubsauger	2.700	40-50	1.215
Kaffeemaschinen	780	20	156
Wasserkocher	140	20	28
Mikrowellenherde	1.725	7	121
Toaster	168	20	34
Div. Küchengeräte	573	15-20	100
Bügeleisen	592	40-50	266
Fön, Hairstyling u.ä.	337	40-50	152
Frittiergeräte	231	40-50	104
Rasierer	86	20	17
Mundhygiene	84	50	42
Zwischensumme 5	7.416		2.235
PCs	1.762	10-12	194
Drucker	865	20	173
Zwischensumme 6	2.627		367
Gesamt (ZWS 2-6)	46.234	Ø 19	8.683
Gesamtsumme	58.729	Ø 25	13.931

* gesetzlich geregelte Rücknahme

Die vorgenommene Abschätzung beschränkt sich im wesentlichen auf den Bereich des privaten Konsums und ist naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet: So fehlen beispielsweise Geräte wie elektrische Werkzeuge, Gartengeräte, Nähmaschinen, Spielzeug, Fotoapparate.

Das jährliche Gesamtaufkommen an EAG aus dem Konsumbereich wurde für 1999 mit ca. 63.000 t angenommen (Tabelle II-3). Die Gegenüberstellung mit dem Ergebnis der konsumseitig durchgeführten Abschätzung zeigt mit Rücksicht auf die Tatsache, dass ein Teil der im Rahmen einer EAG Sammlung anfallenden Geräte konsumseitig nicht erfasst werden konnten, recht gute Übereinstimmung.

Tabelle V-6: Potenzial an EAG in Österreich; Gegenüberstellung abfallseitige und konsumseitige Schätzung (Basis 1999)

Gerätegruppe	Abfallseitig *		Konsumseitig	
	Anteil(%)	Menge (t)	Anteil (%)	Menge (t)
Bildschirm	22	13.778	22	12.778
EKG	20	12.526	24	13.649
Großgeräte	38	23.800	35	19.815
Sonstiges	20	12.526	18	n. erfasst
Summe	100	62.629	100	46.234

* Quelle: Salhofer (32-36)

Der abgeschätzte Kunststoffanteil in den EAG liegt in Summe bei 19% (Tabelle V-5) und damit im erwarteten Bereich. Berücksichtigt man in der Abschätzung auch die Kühlgeräte so steigt der Kunststoffanteil auf 25%. Die im gewerblichen Bereich eingesetzten elektrischen und elektronischen Geräte unterscheiden sich in der Gerätestruktur und auch im Kunststoffgehalt vom Konsumbereich, so dass in Summe der allgemein angenommene Kunststoffgehalt von ca. 20% für die gegenwärtig insgesamt anfallenden EAG realistisch erscheint.

Zieht man die in Tabelle V-5 angeführten Kunststoffmengen und die in Abb. V-1 dargestellte Sortenverteilung für eine Abschätzung der Perspektiven für die stoffliche Verwertung heran, so zeigen sich grundsätzlich folgende auch aus der gegenwärtigen Praxis bekannte Ansatzpunkte:

- Verwertung von Polypropylen aus großen und kleinen Haushaltsgeräten
- Verwertung von ABS aus Haushaltsgeräten und z.T. Geräten der Bürotechnik
- Verwertung von Polystyrol aus Kühl- und Gefriergeräten

Die großen Mengen an Polystyrol und auch ABS, die im Bereich der Unterhaltungselektronik und Teilen der Informations- und Bürotechnik zu finden sind (TV- und Monitorgehäuse), entziehen sich zumindest derzeit weitgehend einer stofflichen Verwertung infolge der Flammenschutzmittelproblematik.

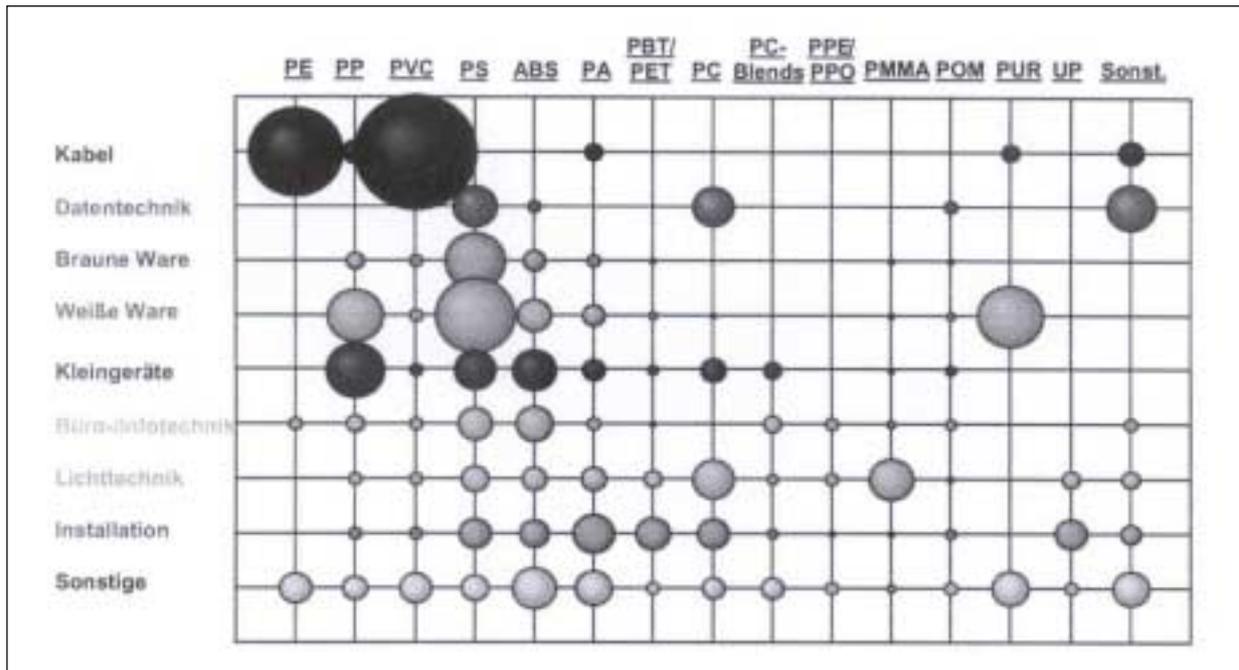


Abb. V-1: Verteilung verschiedener Kunststoffsorten im Anwendungsbereich Elektro/Elektronik

Was die Frage der tatsächlich für eine Verwertung zur Verfügung stehenden Mengen betrifft, so stellen die in Tabelle V-6 und Tabelle V-5 angeführten Kunststoffmengen das Potenzial und damit eine Art erwartetes Maximum dar.

1999 lag die Menge der in Österreich getrennt gesammelten EAG bei ca. 6.200 t, ohne große Haushaltsgeräte sowie Kühl- und Gefriergeräte. Große Haushaltsgeräte werden derzeit noch häufig gemeinsam mit Altmetallen erfasst, sodass die verfügbaren Mengenangaben zu den erfassten Altgeräten unvollständig sind. Kühl- und Gefriergeräte werden im Zusammenhang mit der entsprechenden Verordnung getrennt erfasst und behandelt. Die getrennt gesammelten EAG-Mengen verteilen sich etwa zur Hälfte auf Elektrokleingeräte, die andere Hälfte entfällt auf Bildschirmgeräte

Geht man für die Abschätzung der in den gesammelten EAG verfügbaren Kunststoffmengen davon aus, dass der Kunststoffanteil in etwa dem in Tabelle V-5 dargestellten Werten von ca. 30% für Kleingeräte und 20% für Bildschirmgeräte entspricht, so ergibt sich derzeit (theoretisch) eine verfügbare Gesamtkunststoffmenge von 900 t aus dem Bereich EKG und 600 t aus dem Bereich Bildschirmgeräte.

Tabelle V-7: Sammlung von EAG in Österreich (v.a. Konsumbereich, Daten 1999/2000)

Geräte	Kleingeräte t/a	Bildschirmgeräte t/a
Burgen- land	62	96
NÖ	364	
Kärnten	100	330
OÖ	493 (+300)	466
Salz- burg	240	196
Steier- mark	300	545
Tirol	420	
Vorarl- berg	260	170
Wien	700	1.000
Gesamt	6.276	

V.3 Stoffliche Verwertung

Das Kunststoffpotenzial der Bildschirmgeräte ist derzeit aufgrund der Flammenschutzmittelfrage für eine stoffliche Verwertung wenig relevant. Zum Teil gilt das auch für Geräte aus der Büro- und IT-Technik.

Von Interesse sind somit zunächst Kunststoffe aus Haushalts- und Küchengeräten – manchmal auch als „weiße Ware“ der Elektrokleingeräte (EKG) bezeichnet. Auf Basis der in Tabelle V-5 dargestellten Geräte- und Kunststoffverteilung (56% der EKG mit 30% Kunststoffanteil entfallen auf „weiße“ Ware) sind aus diesem Gerätebereich derzeit ca. 500-600 t Kunststoffe verfügbar. Diese Kunststoffmenge verteilt sich insgesamt zwar auf ca. 10 Kunststoffsorten, es dominieren aber die Gehäusewerkstoffe PP, ABS und PS. Innerhalb der „weißen“ Kleingeräte lassen sich Schwerpunkte für die jeweils eingesetzten Gehäusewerkstoffe finden: so dominieren ABS und PS als Gehäusewerkstoffe für Staubsauger, Bügeleisen, Fön/Hairstylinggeräte, Hygienegeräte, während PP eher für Küchengeräte wie beispielsweise Kaffeemaschinen, Wasserkocher und Toaster zum Einsatz kommt. Im Bereich der Kleingeräte nimmt der Einsatz von PP generell auf Kosten von ABS zu. In den heute im Abfall anzutreffenden Haushalts- und Küchengeräten entfallen auf ABS und PS ca. 60% und auf PP 40% der Gehäusekunststoffe.

Geht man davon aus, dass der Kunststoffanteil der „weißen“ EKG zu 80% auf deren Gehäuse entfällt, so kommen aus den derzeit in Österreich getrennt gesammelten weißen „EKG“ rund 150 t ABS, 140 t PS und ca. 190 t PP grundsätzlich für eine stoffliche Verwertung in Frage.

Legt man einer mittelfristigen Entwicklungsperspektive für die stoffliche Verwertung die im aktuellen EU-Richtlinien-Vorschlag vorgesehene jährliche Mindesterfassungsquote von 4 kg/EW aus dem privaten Bereich zugrunde, so werden in Österreich im Jahr 2005 zumindest 32.000 t EAG mit einem Kunststoffanteil von ca. 9.000 t getrennt zu erfassen und zu verwerten sein.

Unter der Annahme, dass sich die Geräteverteilung in den gesammelten EAG im Vergleich zur gegenwärtigen Situation ändert, indem sich einerseits der Anteil an Bildschirmgeräten und Geräten aus der IT-Bereich erhöht, andererseits der Kunststoffanteil generell steigt, so könnte sich das in Tabelle V-8 dargestellte Bild ergeben.

Tabelle V-8: Abschätzung der zu verwertenden Kunststoffe aus EAG im Jahr 2005

Gerätegruppe	Anteil %	Spez. Sammelmenge kg/EW.a	Gesamt-sammelmenge t/a	Kunststoffanteil %	Kunststoffmenge t/a
Bildschirm	25	1,0	8.092	25	2.023
EKG	25	1,0	8.092	50	4.046
Großgeräte	30	1,2	9.710	20	1.942
Sonstige	20	0,8	6.474	20	1.295
Summe	100	4,0	32.368	Ø 26	9.306

Selbst unter der Annahme, dass 2005 noch keine praktikablen Methoden verfügbar sind, um schadstoffhaltige Kunststoffteile gezielt auszuschleusen und somit alle Gehäuse von Bildschirmgeräten nicht für eine stoffliche Verwertung in Betracht kommen, beläuft sich die grundsätzlich für eine Verwertung vorhandene Kunststoffmenge dann auf insgesamt rund 7.000 t/a.

Zumindest 50% der Kunststoffe aus dem Bereich der „weißen“ EKG werden in Zukunft auf PP entfallen, der Rest wird sich zu etwa 20 % auf ABS, 20% PS und 10% andere Kunststoffe verteilen. Aus Geräten der Unterhaltungselektronik ist vornehmlich PS zu erwarten. PP wird verstärkt auch aus Großgeräten anfallen, wobei die Möglichkeit einer gemeinsamen Verwertung mit Material aus den EKG zu überprüfen sein wird, aber eher unwahrscheinlich erscheint. Die Qualität und Verwertbarkeit der infolge der bei Großgeräten üblichen langen Nutzungsdauer stark beanspruchten Kunststoffe sind grundsätzlich noch zu untersuchen.

Unter der Annahme, dass sich die Geräteverteilung in den gesammelten Kleingeräten nicht dramatisch ändert und etwa 50% der EKG auf weiße Ware entfällt werden beispielsweise in gesammelten Staubsaugern ca. 500 t ABS zur Verfügung stehen, in Küchengeräten ca. 700 t PP und ca. 500 t PS in Geräten der „braunen“ Ware. Die aus dem Bereich der Büro- und IT-Technik anfallenden Gerätemengen sind schwierig abschätzbar, zudem sie sowohl aus dem Bereich des privaten Konsums als auch aus dem industriell/gewerblichen Bereich zu erwarten sind. Obwohl die darin enthaltenen Kunststoffmengen nur zum Teil für eine stoffliche Verwertung in Frage kommen, ist doch davon auszugehen, dass aus diesem stark steigendem Gerätesektor einige hundert Tonnen an PS und ABS zur Verfügung stehen. Eine Prognose über die Entwicklungen im Bereich der Investitionsgüter ist sowohl was die Art und Menge der anfallenden Geräte betrifft als auch die darin enthaltenen

Kunststoffe und deren Verwertbarkeit auf der Basis nur lückenhaft vorhandener Daten derzeit eigentlich nicht möglich.

Mittelfristig lassen sich aus dem Bereich EAG sicher gezielt Materialströme gewinnen, die sowohl im Hinblick auf ihre Zugänglichkeit als auch die verfügbare Menge für eine stoffliche Verwertung interessant sind. In ausgewählten Bereichen ist auch eine Bündelung mit sortengleichen Kunststofffraktionen aus anderen Abfallströmen vorstellbar.

So fallen beispielsweise aus Altfahrzeugen jährlich ca. 800 t PP aus Batteriekästen an, etwa 3.000-3.500 t werden aus Stoßfängern erwartet. Inwieweit und in welchem Ausmaß diese PP Ströme in der Praxis gemeinsam aufbereitet und verarbeitet werden können, muss im Einzelfall geklärt werden und hängt sehr wesentlich vom geplanten Einsatz des Recyclates ab.

In Österreich sind derzeit 9 Kunststoffverwertungsbetriebe tätig, die gemeinsam über eine Regranulierkapazität von ca. 86.000 t/a verfügen. Die in Österreich verfügbare Mahlkapazität im Bereich Kunststoffrecycling liegt bei ca. 185.000 t/a und verteilt sich auf insgesamt 16 Betriebe. Alle Regranulierbetriebe verfügen auch über Mahlkapazitäten, die in der Regel höher sind als die jeweilige Granulierkapazität. Die Verfahrenskapazitäten Mahlen und Granulieren dürfen allerdings nicht additiv gesehen werden. In vielen Fällen beinhaltet die Verwertung den Mahlvorgang als Vorstufe zur Regranulierung.

Neben den klassischen Kunststoffverwertern stehen in Österreich auch Anlagen für die mechanische Aufbereitung von EAG zur Verfügung, wovon zumindest eine auch derzeit in der Lage ist, sortenreines Kunststoffmahlgut zu herzustellen. Die Verwertung der in den EAG enthaltenen Kunststoffe über die klassische „Route“ stellt - bei Anlieferung sortierter Fraktionen - für die heimischen Kunststoffverwerter kein grundsätzliches (Kapazität)Problem dar, auch nicht unter dem Gesichtspunkt, dass aus anderen Abfallströmen zunehmend Kunststoffe in die stoffliche Verwertung gelangen sollen und müssen. Bei Vorhandensein der entsprechenden Materialströme und einer wirtschaftlichen Perspektive lassen sich ev. zusätzlich erforderliche Verarbeitungskapazitäten schaffen.

Die große Schwierigkeit liegt vielmehr in der Bereitstellung der sortierten Fraktionen und der notwendigen Bündelung der geringen Materialströme. Das erfordert die Errichtung von Demontage- und Sortierzentren und ein entsprechendes Logistikkonzept. Für die Verwertungsvariante über die mechanische Aufarbeitung ist eine Ausweitung der in Österreich verfügbaren Anlagenkapazitäten notwendig. Der für dieses Verfahren notwendige Sortier- und Demontageaufwand ist geringer und konzentriert sich auf die Bildung von definierten „Verwertungsklassen“. Unabhängig vom gewählten technischen Verwertungsweg ist der Aufbau der für eine technisch und ökonomisch sinnvolle stoffliche Verwertung notwendigen Partnerschaften unbedingt erforderlich.

Überlegenswert im Hinblick auf die Bereitstellung sortierter Materialströme ist die von der „*Österreichischen Gesellschaft für System- und Automatisierungstechnik*“ vorgeschlagenen Errichtung spezialisierter Demontagebetriebe zur Gewinnung wiederverwendbarer Elektronikbauteile aus EAG.

Der Grundgedanke dieses Logistik- und Demontagekonzeptes besteht darin, den Gesamtstrom an EAG bereits an der Anfallstelle aufzuspalten:

- In einen Strom, der wertvolle, wiederverwendbare Geräte und Komponenten enthält
- In einen allgemeinen Gerätestrom, der einer Aufarbeitung zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen (Metalle, Kunststoffe, Glas) zugeführt wird.

Die Teilung sollte aus Qualitätsgründen bereits direkt am Ort des Abfallanfalles geschehen. Während der allgemeine Abfallstrom unangetastet bleibt und konventionellen Verwertungs- und Entsorgungsrouten zugeführt wird, werden Reuse-Geräte bzw. deren wiederverwendbare Komponenten bei den Sammlern erfasst und zu speziellen Vordemontage-Zentren gebracht, in denen zunächst eine Sortierung in funktionsfähige und nicht mehr funktionsfähige Geräte erfolgt. Erstere können dem Secondhand-Markt zugeführt werden, Zweitere einer gezielten Vordemontage, mit dem Ziel wiederverwendbare Komponenten wie z.B. Netzwerkkarten, Festplatten, Diskettenlaufwerke sowie Komponenten mit wertvollen wiederverwendbaren Bauteilen wie etwa Leiterplatten zu extrahieren. Die Demontagereste gelangen zurück in den allgemeinen Entsorgungs- bzw. Recyclingstrom. Die in der Vordemontage gewonnenen Komponenten können z.T. direkt dem Reuse-Markt zur Verfügung gestellt werden, aus den nicht direkt verwendbaren Komponenten sollen mit Hilfe einer speziell dafür entwickelten, halbautomatischen intelligenten Demontagezelle wertvolle verwendbare Bauteile gewonnen und dem Reuse-Markt zugeführt werden. Die praktische Prüfung dieses Konzeptes am Beispiel Leiterplatten und deren Bauteilen steht im Burgenland kurz bevor. (Fa. Re-Use, Umweltdienst Burgenland).

Voraussetzung für dieses Konzept der gezielten Demontage sind definierte Vorgaben für die Art und die Qualität der für die Wiederverwendung bestimmten Komponenten und Bauteile. Diese Vorgaben bilden einerseits die Auswahlkriterien für die Teilung des EAG-Stromes an den Sammelstellen und bestimmen die Richtlinien für die Demontage. Die konkreten Demontageanleitungen müssen in Zusammenarbeit mit den Geräte- bzw. Komponentenherstellern und den potentiellen Kunden des Reuse-Marktes erstellt werden und die Demontage selbst erfordert entsprechend geschultes Personal.

Prinzipiell ähnliche Anforderungen stellen sich im Zusammenhang mit der Bereitstellung von Kunststofffraktionen für die stoffliche Verwertung und lassen daher das vorgestellte Konzept auch für Kunststoffe grundsätzlich sinnvoll erscheinen. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Nutzung von Synergien liegt der Gedanke nahe, verschiedene Zielfraktionen in einem Demontagezentrum bzw. einem gemeinsamen Netz von Demontagezentren zu gewinnen.

Gegenwärtig fehlen genau diese für die stoffliche Verwertung notwendigen Strukturen zur Gewinnung von verwertbaren Kunststoffströmen.

Kunststoffe, die im Zuge der üblichen mechanischen Aufarbeitung von EAG anfallen werden als Reststoffe überwiegend durch Deponieren entsorgt. Ausnahmen bilden nur Chargen gleichartiger Geräte oder -teile, die aus verschiedensten Gründen aus der Produktion oder dem Handel direkt an Entsorger abgegeben werden, und deren Zusammensetzung genau bekannt ist. In diesen Fällen erfolgt eine Demontage großer Kunststoffteile für die Herstellung von Mahlgut bekannter Herkunft und mit definierten Eigenschaften, für das auch leicht Abnehmer zu finden sind. Mittelfristig wird sich die Situation aufgrund der neuen gesetzlichen Vorgaben ändern müssen.

V.4 Thermische Verwertung in Österreich

Die gesamte Behandlungskapazität der in Österreich verfügbaren Abfall- und Reststoffverbrennungsanlagen liegt bei 800.000 t/a und ist an den Standorten Wien, Wels und Lenzing konzentriert.

In den beiden Wiener Anlagen sowie in der in Wels betriebenen Anlage gelangen bereits heute Kunststoffabfälle aus den getrennt oder über den Systemmüll erfassten EAG in die thermische Nutzung. In Wien sind das ca. 1.800 t/a. *Laut Analysen der MA 48 finden sich in dem insgesamt von der MA 48 behandelten Abfall derzeit ca. 6.000 t Elektro- und Elektronikschrott, wovon ca. 1.200 t getrennt erfasst werden. Rechnet man mit einem Kunststoffanteil von 20%, so gelangen ca. 1.200 t Kunststoffabfälle aus dem Elektro- und Elektronikschrott in die thermische Verwertung. Dazu kommen noch ca. 600 Tonnen aus den getrennt erfassten und behandelten Kühlgeräten*

Für Wels lässt sich die aus EAG verwertete Kunststoffmenge mit ca 200 t nur sehr grob abschätzen. *Bei einem jährlichen Gesamtdurchsatz von ca. 70.000 t vornehmlich Hausmüll, mit einem EAG-Anteil von 1,5 % in Oberösterreich (Hauer, 1999), beläuft sich der angenommene 20 % Kunststoffanteil auf 210 t.*

Das ausnahmslose Inkrafttreten der Deponieverordnung mit 1.1.2004 bedeutet für Kunststoffe generell, dass sie, sofern sie nicht einer stofflichen oder chemischen Verwertung zugeführt werden, verpflichtend einer thermischen Behandlung/Verwertung in entsprechenden Verbrennungsanlagen zuzuführen sind.

Aus EAG ist in den nächsten Jahren unabhängig von der Art der Sammlung insgesamt eine Kunststoffabfallmenge von 20-30.000 t/a zu erwarten, die mittelfristig auf etwa 50-60.000 t/a ansteigen wird. Ungeachtet der Tatsache, dass ein Teil dieser Abfälle im Zusammenhang mit der Erfüllung der EU-Richtlinie einer stofflichen Verwertung zuzuführen ist, hängt die Realisierung der thermischen Verwertung der verbleibenden Kunststoffmengen im wesentlichen von der Verfügbarkeit geeigneter Verbrennungsanlagen ab. Für Kunststoffe aus EAG werden das in der Regel Abfallverbrennungsanlagen sein, deren Verfügbarkeit im Zusammenhang mit der Umsetzung der Deponieverordnung zu sehen ist: Die in Österreich erforderliche Anlagenkapazität für die thermische Behandlung/Verwertung wird mit 4-5 Millionen t/a angenommen, wovon etwa 2,8 Millionen t/a auf Abfallverbrennungsanlagen entfallen werden.

Ingesamt werden jährlich etwa 8 Millionen Tonnen Abfall vom Deponierungsverbot betroffen sein, wovon ca. 3,4 Millionen Tonnen für eine stoffliche Verwertung in Frage kommen und weitere 1,4 Millionen Tonnen von ihrer Zusammensetzung her für den Einsatz in Industrieheizungsanlagen geeignet sind, wie z.B. Altholz, Altreifen, Altöl und andere definierte Abfälle ohne emissionsrelevante Schadstoffgehalte. (4)

In welchem Ausmaß der Weg einer Verwertung in Industrieheizungsanlagen für Kunststoffe aus EAG offen ist, ist derzeit aufgrund mangelnder Erfahrung noch schwierig abzuschätzen. Für einen Teilstrom wird er in Frage kommen, wobei davon auszugehen ist, dass sich dieser wenig belastete Teilstrom deutlich mit dem für die stoffliche Verwertung geeigneten Strom überschneidet. Die „Brennstoffherstellung“ greift somit zum Teil auf die gleiche „Rohstoffquelle“ zu wie die stoffliche Verwertung. Die Änderungen in der Additivierung der heute beim Bau von Elektrogeräten eingesetzten Kunststoffe werden sich mittel- bis langfristig positiv auf die Qualität der Abfallkunststoffe auswirken und auch die Möglichkeiten sie als Zusatz- und Ersatzbrennstoffe einzusetzen, erhöhen.

In der direkten Konkurrenz zur stofflichen Verwertung werden sich für diesen Weg sicher ökonomische Vorteile ergeben. Trotz einer auch für die „Brennstoffgewinnung“ notwendigen Aufbereitung, wie etwa das Aussondern bestimmter belasteter Kunststoffteile, die Abtrennung von Metallen und eine entsprechende Zerkleinerung, ergeben sich durch den Wegfall der Sortentrennung sicherlich Kostenvorteile.

VI. ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE ASPEKTE VERSCHIEDENER VERWERTUNGSWEGE FÜR KUNSTSTOFFE AUS EAG

VI.1 Ökologische Aspekte

Für die Untersuchung von ökologischen Auswirkungen, die von Produktionsprozessen im weitesten Sinn und in der Folge auch von konkreten Produkten hervorgerufen werden, hat sich die Ökobilanzierung (Life Cycle Analysis, Life Cycle Assessment) etabliert.

Ausgehend vom gewünschten Ziel des betrachteten Prozesses bzw. Nutzen eines Produktes oder Produktsystems werden die damit verbundenen Belastungen für die Umwelt erfasst. Als messbare Parameter für Belastungen der Umwelt werden derzeit die Menge und Art der benötigten Rohstoffe, der Verbrauch von Energie und verschiedenen Energieträgern, die Emission von Schadstoffen in die Luft und das Wasser sowie die Menge und Qualität zu entsorgender Reststoffe herangezogen.

Für diese als Sachbilanzierung bezeichnete Erhebung von Primärdaten gibt es inzwischen eine international weitgehend anerkannte und normierte Vorgangsweise. Die Primärdaten sind in ihrer Vielzahl und -falt unüberschaubar und auch nicht geeignet Aussagen darüber zu ermöglichen, in welchem Ausmaß die betrachteten Prozesse bzw. Produkte oder Produktsysteme zu Umweltproblemen beitragen. Das Herausgreifen einzelner Parameter birgt die Gefahr falscher Schlussfolgerungen. Für die Abschätzung von Umweltauswirkungen hat sich daher die Durchführung einer Wirkungsanalyse etabliert (Methoden SETAC und ISO).

In einem ersten Schritt werden die von Primärbelastungen verursachten Umweltauswirkungen identifiziert und in Form von speziellen Wirkungskategorien definiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Zuordnung der Primärbelastungen zu den Wirkungskategorien, wobei eine Primärbelastung auch mehreren Wirkungskategorien zugeordnet werden kann. So sind z.B. Stickoxidemissionen in den Kategorien Versauerung, Eutrophierung und Bildung von photochemischem Smog (bodennahes Ozon) wirksam.

Da verschiedene Primärbelastungen innerhalb einer Kategorie unterschiedlich wirksam sind, wird für jede der Kategorien eine Leitsubstanz festgelegt (z.B. CO₂ für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt) und die einer Kategorie zugeordneten Belastungen werden in ihrer Wirksamkeit auf diese Leitsubstanz bezogen. Die auf diese Weise erhaltenen Äquivalenzfaktoren ermöglichen ein Zusammenfassen der Beiträge verschiedener Primärbelastungen innerhalb einer Kategorie. Auch im Bereich der Wirkungsanalyse gibt es bereits anerkannte Methoden (SETAC, ISO), selbst wenn es Wirkungskategorien gibt, die noch intensiv diskutiert werden wie z.B. die Human- und Ökotoxizität.

Den letzten Schritt einer Ökobilanz stellt die Bewertung dar. Sie versucht im Rahmen einer Interpretation des Gesamtergebnisses die relative Bedeutung der verschiedenen Wirkungskategorien untereinander zu erfassen. Während die eigentliche Wirkungsanalyse vornehmlich auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen basiert, fließen in die Bewertung gesellschaftliche und politische Werte und Aspekte ein.

Für die Durchführung des überaus schwierigen Bewertungsschrittes steht bisher keine anerkannte Methodik zur Verfügung und sie wird daher selten durchgeführt.

VI.1.1 Ökobilanzielle Untersuchung von Kunststoffverwertungsverfahren

Für die Verwertung der vom DSD in Deutschland gesammelten Kunststoffverpackungen wurden insgesamt 12 verschiedene Verwertungsmöglichkeiten (stoffliche Verwertung mit 4 Produktvarianten, 5 rohstoffliche und 3 thermische Verfahren) im Rahmen einer Ökobilanz (Sachbilanz und Wirkungsanalyse) konkret untersucht (13, 23).

Die bilanzierten Verwertungsverfahren führen zu sehr unterschiedlichen Produkten, neuen Kunststoffwaren im Fall der stofflichen Verwertung, Dampf und Strom im Fall der thermischen und chemischen Grundstoffen im Fall der rohstofflichen Verfahren. Um hier einen Vergleich der Umweltauswirkungen anstellen zu können, wurde die sogenannte Nutzenkorbmethode angewandt: Die stoffliche Verwertung liefert z.B. 1 kg Produkt, die thermische Verwertung z.B. 26 MJ Dampf. Um diese beiden Verwertungswege vergleichen zu können sind die Nutzenkörbe der beiden Verwertungswege jeweils um das Produkt des anderen Verwertungsweges zu ergänzen. So wird der Nutzenkorb der stofflichen Verwertung um 26 MJ Wärme ergänzt, die auf konventionellem Weg erzeugt wird, der Nutzenkorb der thermischen Verwertung um 1 kg Kunststoffprodukte aus Neuware ergänzt. Auf diese Weise liefern die beiden Verwertungswege einen identischen Nutzen und sind somit unter den Gesichtspunkten der Ökobilanzierung vergleichbar. Die vom Fraunhofer Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung in Freising durchgeführte Untersuchung kommt zu folgendem Ergebnis (23):

- Der ökologische Nutzen verschiedener Verwertungsverfahren wird wesentlich davon bestimmt, in welchem Umfang die Verwertungsprodukte die Herstellung von herkömmlichen Produkten aus Primärressourcen „überflüssig“ machen und mit welchen Umweltbelastungen dies verbunden ist.
- Die Unterscheidung in stoffliche, rohstoffliche und thermische Verfahren erlaubt a priori keine Aussage über den ökologischen Nutzen des Verwertungsverfahrens.
- Die im Rahmen der Untersuchung betrachteten thermischen Verfahren sind bei effizienter Energienutzung gegen die untersuchten rohstofflichen Verfahren konkurrenzfähig.
- Werkstoffliche Verfahren zeigen unter der Voraussetzung, dass die Regranulate Neuware im Verhältnis 1:1 ersetzen und die Aufbereitung mit geringen Materialverlusten verbunden ist, deutliche ökologische Vorteile.
- Die im Zusammenhang mit der stofflichen Verwertung ökonomisch so relevanten Prozesse wie Transport, Sammlung und Sortierung sind unter ökologischen Gesichtspunkten nicht relevant.

Die konkreten Ergebnisse der Arbeit gelten strenggenommen nur für die untersuchte Situation - die Verwertung von Verpackungsabfällen aus dem DSD System mit den in Deutschland zur Verfügung stehenden Verfahren - und dürfen sicher nicht generalisiert werden. Anhand der aufgezeigten grundlegenden Kriterien für den ökologischen Nutzen, lassen sich aber zumindest erste Abschätzungen über die ökologische Sinnhaftigkeit bzw. den ökologischen Nutzen verschiedener Verwertungsverfahren in anderen Abfallbereichen durchführen.

Die Anwendung der genannten Kriterien für die Verwertung von Kunststoffen aus EAG ergibt folgendes Bild:

- Die gegenwärtige Praxis der stofflichen Verwertung belegt, dass die gewonnenen Mahlgüter und Regranulate überwiegend von hoher Qualität sind (Reinheit > 99%), in technischen Anwendungsbereichen wie dem Automobilbau, vereinzelt auch wieder im E & E Bereich (Grundig) zum Einsatz kommen und überwiegend einen Substitutionsgrad für Neuware von 1 aufweisen.
- Ähnlich wie der Aufwand für Sammlung, Transport und Sortierung ist der im Fall von Kunststoffen aus EAG notwendige Aufwand für die Demontage ökologisch nicht relevant.
- Umweltbelastung und Höhe der Materialverluste durch die Aufbereitung und Verwertung hängen vom gewählten Verfahren ab. Sie werden beim Modell „Grundig“ mit seiner weitgehend manuellen Sortierung und Trennung geringer ausfallen als bei der mechanischen Aufbereitung.

Unter rein ökologischen Gesichtspunkten lässt sich die stoffliche Verwertung für Kunststoffe aus EAG, die keine unerwünschten Additive enthalten, mit hoher Wahrscheinlichkeit als sinnvoll prognostizieren.

Für stofflich nicht verwertbare Kunststoffe bieten sich rohstoffliche und thermische Verfahren an, wobei in Österreich gegenwärtig nur thermische Verfahren zur Verfügung stehen. Eine Aussage, welches Verfahren innerhalb dieser Verfahrensgruppe aus Sicht des ökologischen Nutzens zu bevorzugen ist, ist in dieser allgemeinen Form extrem schwierig, da im Vergleich zur stofflichen Verwertung wesentlich mehr individuelle anlagenspezifische Einflüsse zu berücksichtigen sind: Verbrennungstechnologie, Verbrennungstemperaturen, Kesselwirkungsgrad, emissionsmindernde Einrichtungen, Nutzenergieauskopplung, Abnahmestruktur für die Verwertungsprodukte Dampf und/oder Strom u.a.m.

Im Fall schadstoffreicher Kunststofffraktionen gewährleistet die Verbrennung, die sichere Ausschleusung von Schadstoffen aus Produktkreisläufen und die kontrollierbare Lagerung in sicheren Senken. Dieser Vorteil steht dem Nachteil des Stoffverlustes inklusive des Verlustes der für die Herstellung der Kunststoffe erforderlichen Prozessenergie gegenüber. Die Prozessenergie für Kunststoffe liegt je nach Komplexität des

derlichen Prozessenergie gegenüber. Die Prozessenergie für Kunststoffe liegt je nach Komplexität des Herstellungsprozesses zwischen 60 (PVC) und 110 MJ/kg.

VI.2 Ökonomische Aspekte

Unter rein betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG derzeit nur in Ausnahmefällen rentabel.

Die Kosten für die erforderlichen Sortier- und Demontageschritte müssen je nach Gerätegruppe und Demontageaufwand mit ATS 3,00 bis 6,00/kg (€0,22-0,44) angesetzt werden, wobei die nachfolgend angewandte Aufbereitungstechnologie Einfluss nimmt.

Die eigentlichen Aufbereitungskosten liegen je nach angestrebter Recyclatqualität und gewählter Technologie im Bereich von ATS 3,00 bis 5,00/kg (€0,22-0,36/kg).

Die „traditionelle“ Aufarbeitung demontierter und sortierter Kunststoffteile kommt dabei mit Kosten von ca. ATS 4,00 (€0,29/kg) aus, die entsprechenden Kosten für die Herstellung von sortenreinem Kunststoffmahlgut durch eine mechanische Aufarbeitung vorsortierter Verwertungsklassen liegen im Bereich von ATS 3,00 -5,00/kg (€0,22-0,36/kg).

Die Preise für die Übernahme von EAG liegen in Österreich je nach Gerätegruppe bei ATS 150-200/Stk. (€ 11-14) für Bildschirmgeräte, ATS 2-4/kg (€0,15-0,3) für Kleingeräte, ATS 350-520/Stk. (€25-38) für Kühlgeräte und ATS 70-100/Stk. (€5-7) für Großgeräte.

Die auf dem Sekundärmarkt erzielbaren Erlöse für Mahlgut und Regranulat zeigen einerseits große Bandbreiten und unterliegen zusätzlich sehr großen Schwankungen in Abhängigkeit vom Preis für Primärware (Der Preis für ABS Primärware lag 1998 bei ca. ATS 19,00 (€1,38) im Februar 2001 dagegen bei ATS 35,00 (€ 2,54)).

Als Richtwert kann man davon ausgehen, dass Recyclatpreise in etwa bei 50-70% der Neuwarenpreise liegen, wobei aber deutliche Abweichungen nach oben und auch nach unten möglich sind. Bei sehr hohen Primärpreisen und der damit meist eintretenden Materialknappheit steigt das Preisniveau für Recyclate entsprechend.

Preise für Kunststoffneuware (Stand Frühjahr 2001)

PE	ATS 11,9 - 12,6 (€0,86-0,92)
PP	ATS 11,2 - 11,9 (€0,81-0,86)
PS	ATS 13,0 - 14,0 (€0,94-1,02)
ABS	ATS 28,0 - 40,0 (€2,03-2,91)

Die pro Kunststoffsorte noch geringen verfügbaren Mengen erschweren den Aufbau von dauerhaften Liefer-/Abnahmebeziehungen zwischen Verwertern und Kunststoffverarbeitern, was die ökonomische Sinnhaftigkeit der Verwertung zusätzlich in Frage stellt.

VI.3 Ökologisch/ökonomische Aspekte

Die Praxis der Abfallwirtschaft im allgemeinen und der Kunststoffverwertung im besonderen zeigt, dass unter rein ökologischen Gesichtspunkten sinnvolle und wünschenswerte Verfahren und Prozesse oft mit hohen ökonomischen Belastungen zu kämpfen haben. Vor allem die für eine stoffliche Verwertung erforderlichen kostenintensiven Vorbehandlungen Sortierung, Trennung, Demontage usw. wirken ökonomisch „limitierend“.

Die Anwendung von Kosten-Nutzen-Analysen versucht die Frage der Sinnhaftigkeit verschiedener abfallwirtschaftlicher Verfahren umfassender zu betrachten. Einige der in den letzten Jahren in Österreich durchgeführten Kosten-Nutzen Analysen befassen sich konkret mit der Verwertung von Kunststoffen, sowohl Verpackungen als auch Nicht-Verpackungen. (18,19)

Das Instrument der Kosten Nutzen Analyse zieht für die Bewertung der Verwertungswege folgende Parameter heran:

- **Ökologische Analyse:** Bilanz des Primärenergieverbrauchs, der CO₂- und CH₄-Emissionen, der TOC-Emissionen und der direkt deponierten Abfallmengen eines Verwertungsweges einschließlich der ersparten Kunststoffprimärproduktion und der ersparten Sammlung und Entsorgung von Kunststoffabfällen gemeinsam mit Restmüll.
- **Abfallwirtschaftliche Nettokostenanalyse:** Betriebswirtschaftliche Bilanz eines Verwertungsweges von der getrennten Sammlung bis zur Verwertung, einschließlich der ersparten Restmüllsammlung und -entsorgung.
- **Volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse:** Erweiterung der abfallwirtschaftlichen Nettokostenanalyse um den volkswirtschaftlichen Nutzen der ersparten Kunststoffprimärproduktion und Strom-/Wärmeproduktion sowie Berücksichtigung "externer Effekte" durch Monetarisierung der untersuchten ökologischen Effekte eines Verwertungsweges.

Für die Beurteilung verschiedener Verwertungswege aus ökologischer, ökonomischer und volkswirtschaftlicher Sicht mit Hilfe der Kosten-Nutzen-Analyse wurde ein Computer-Rechenmodell erstellt, das folgende Aspekte berücksichtigt:

- Güterbilanz für Kunststoffe von der Produktherstellung bis zur Verwertung oder Behandlung als Abfall.
- Betriebswirtschaftliche Kostenbilanz von der Erfassung der Abfälle bis zur Verwertung oder Abfallbehandlung.
- *Quantifizierung der folgenden aus ökologischer Sicht bedeutungsvollen Parameter:*
 - Substituierte Primärproduktion*
 - Veränderung von Emissionen (CO₂, CH₄, TOC)*
 - Erspartes Deponierungsrisiko*
- *Monetarisierung und Internalisierung der genannten "ökologischen" Faktoren für die volkswirtschaftliche Bewertung.*
- *Darstellung der volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Relation, sodass durch Variation von Parametern das entsprechende Optimum gefunden werden kann.*

(Auszug: Hutterer, Pilz, Angst, Museal-Mencik: Stoffliche Verwertung von Nichtverpackungs-Kunststoffabfällen. Kosten-Nutzen-Analyse von Maßnahmen auf dem Weg zur Realisierung einer umfassenden Stoffbewirtschaftung von Kunststoffabfällen“ UBA Monographien Band 124)

Zusammensetzung einer Kosten –Nutzen Analyse:

- Kosten der getrennten Sammlung und Sortierung
- Nettokosten der stofflichen Verwertung (Berücksichtigung der Recyclaterlöse)
- Nettokosten der thermischen Verwertung des Sortierrestes
- + Ersparte Kosten der Restmüllsammlung
- + Ersparte Nettokosten der Restmüllbehandlung und Deponierung
- = Ergebnis der abfallwirtschaftlichen Nettokostenanalyse**
- + Ersparte Kosten der Primärproduktion und konventionellen Energieumwandlung (Substitutionseffekte)
- + Ersparte Kosten von Emissionsvermeidung und Deponiesanierung (externe Effekte)
- = Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse**

Hutterer, Pilz et al. (19) unterziehen die Verwertung von Kunststoffen aus EAG einer Kosten-Nutzen Analyse und kommen grundsätzlich zu einem positiven Ergebnis: Die stoffliche Verwertung von Kunststoffteilen aus EAG ist gemäß dieser Analyse sowohl unter ökologischen als auch volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll.

Tabelle VI-1: Kosten Nutzen Bilanz für stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG

Angaben in ATS/kg Kunststoff	Bildschirmgeräte	Kleingeräte	Großgeräte	Kühlgeräte
Kosten Sortierung und Demontage	-4,50	-6,0	-4,50	0,00
Kosten für stoffliche u. thermische Verwertung	4,84	0,67	0,67	9,18
Ersparte Kosten Restmüllsammlung	0,46	0,46	0,46	0,87
Ersparte Kosten Restmüllbehandlung	2,09	2,09	2,09	0,00
Abfallwirtschaftliche Nettokostenbilanz	2,89	-2,78	-1,28	11,28
Ersparte Primärprod. u. Energieumwandlung	6,17	3,39	3,39	1,28
Ersparte Emissionvermeid. u.. Deponiesanierung	3,25	2,51	2,51	4,72
Volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen Bilanz	12,31	3,13	4,63	21,23

* Bezugsszenarium: Restmüllentsorgung mit einem MVA-Anteil von 80%

Annahmen und Parameter für die Berechnungen:

Sammelkosten: unter der Annahme, dass EAG ohnehin getrennt gesammelt werden müssen, werden für die Kunststoffe keine Sammelkosten veranschlagt

Verwertungskosten stofflich: Summe aus Recyclaterlösen (60% des Neuwarenpreises, Basis 1998) Verfahrenskosten (Prozesskosten ATS 4,00 + Overhead-Kosten + Zuschlag für Wagnis u. Gewinn) und Kosten für das Inputmaterial

Verwertungskosten thermisch: ATS 1.520/t

Kosten für die Restmüllsammlung: ATS 2090/t

Kosten für die Restmüllbehandlung: ATS 1.930/t (MVA), ATS 1560/t Deponie

Tabelle VI-2: Bedeutung der abfallwirtschaftlichen Nettokostenbilanz (ANB) und der Kosten-Nutzen-Bilanz (KNB) für die Praxis

	ANB	KNB
A	positiv	positiv
B	negativ	positiv
C	positiv	negativ
D	negativ	negativ

Fall A: In diesem Fall ergeben sich bereits aus betriebswirtschaftlicher Sicht Vorteile. Wenn die stoffliche Verwertung dennoch nicht erfolgt, so kann das daran liegen, dass die finanziellen Vorteile nicht bewusst, oder auch zu gering sind. In beiden Fällen empfehlen die Studienautoren entsprechende Bewusstseinsbildung.

Fall B: In diesem Fall bringt die stoffliche Verwertung keinerlei finanziellen Vorteil. Lediglich idealistische Motivation kann dazu führen, sie dennoch zu realisieren. Ohne diese Motivation bedarf es für die Umsetzung finanzieller Anreize. Auch neue gesetzliche Rahmenbedingungen (z.B. Deponieverordnung, EU-Richtlinien) können hier zu Änderungen führen.

Fall C: Dieser Fall ist äußerst selten und wurde in der Studie nicht untersucht.

Fall D: Falls so ein Fall auftritt, so sollte er keinesfalls realisiert werden.

Gemäß Tabelle VI-1 und VI-2 ergeben sich auf Basis dieser Studie für Kunststoffe aus EAG im Fall von Bildschirmgeräten und Kühlschränken positive Effekte aus betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Sicht (Fall A) und auch für Klein- und Großgeräte wäre das Ergebnis der Kosten Nutzen Bilanz positiv.

Die Ergebnisse der Studie sind im Hinblick auf die gegenwärtig reale Situation allerdings zu relativieren, da in der Betrachtung wesentliche Elemente für die Praxis der stofflichen Verwertung von Kunststoffen aus EAG wie z.B. die hohe Sortenvielfalt, die geringen verfügbaren Mengen, die Schadstoffproblematik sowie der Markt und die Akzeptanz für Recyclate keine Rolle spielen.

Diesem Aspekt tragen die Autoren der Studie in ihrer Schlussbetrachtung auch Rechnung, wenn sie für die stoffliche Verwertung von Kunststoffen aus EAG erst mittelfristig Handlungsbedarf sehen, da die notwendigen Mengen derzeit nicht verfügbar sind.

VII. ZUSAMMENFASSUNG UND RESÜMEE

Unter technischen Gesichtspunkten stehen für die Verwertung von Kunststoffen aus EAG stoffliche, rohstoffliche und thermische Verfahren zur Verfügung. Für schadstoffhaltige Fraktionen kommt eine stoffliche Verwertung aus stoffpolitischen Überlegungen eher nicht in Frage. In Österreich werden derzeit keine Anlagen zur rohstofflichen Verwertung betrieben, in Deutschland stehen dafür Anlagen zur Druckvergasung zur Verfügung.

Im Unterschied zu Verpackungskunststoffen, deren Verwertung beinahe als etabliert zu bezeichnen ist, liegen die Kunststoffe in EAG nahezu immer im Verbund mit anderen Werkstoffen vor, ihre Sortenvielfalt ist deutlich höher, ihre Konzentration ist dagegen bezogen auf das Produkt (Gerät) deutlich geringer und ihr Schadstoffpotenzial ist zumindest in Einzelbereichen deutlich höher. Diesen Tatsachen ist bei der Verwertung Rechnung zu tragen. Gravierend sind die Auswirkungen im Bereich der stofflichen Verwertung: Die vorhandenen „klassischen Verwertungsstrukturen“ müssen um die Demontage erweitert, die Sortierung den höheren Anforderungen durch Sortenvielfalt, Farbvielfalt und möglichem Schadstoffgehalt angepasst werden. Beide Verfahrensschritte sind sehr kostenintensiv.

Als Alternative zur Bereitstellung sortenreiner Materialströme für die klassische Verwertungsrouten über intensive (händische) Demontage und Sortierung bietet sich die Anwendung einer mechanischen Aufarbeitung vorsortierter Geräte an. Die Anpassung des aus der Metallaufbereitung bekannten Verfahrensablaufes durch die Installation zusätzlicher Trenn- und Sortiermodule für die Nichtmetallfraktionen ermöglicht es, auch sortenreines Kunststoffmahlgut von hoher Reinheit herzustellen.

Die aktuelle Situation betreffend die Verwertung von Kunststoffen aus EAG ist durch ein noch sehr geringes Mengenaufkommen getrennt gesammelter Geräte und das Auftreten sehr alter Geräte gekennzeichnet, wodurch auch die verfügbare Menge an Kunststoffen bescheiden ist. Das teilweise hohe Alter der Geräte hat zur Folge, dass die darin enthaltenen Kunststoffe heute teilweise gar nicht mehr zur Anwendung kommen, und z.T. mit Additiven versehen sind, die bereits heute oder in naher Zukunft nicht mehr verwendet werden dürfen oder sollten.

Die Praxis der Sammlung und Verwertung konzentriert sich auf die Entfernung von Schadstoffen und die Rückgewinnung der Metalle, die eigentlichen Wertstoffe darstellen. Kunststoffe werden mit allen anderen Reststoffen noch deponiert oder so die Möglichkeit vorhanden ist, einer thermischen Behandlung bzw. Verwertung zugeführt. Die stoffliche Verwertung ist unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten nur selten rentabel und spielt derzeit nur im Rahmen engagierten Einzelinitiativen eine Rolle.

Diese Praxisbeispiele zeigen trotz unterschiedlichem technischen Zugang sehr deutlich das **wesentliche Kriterium** für den Aufbau eines langfristig auch ökonomisch rentablen stofflichen Recyclings: **Die Zusammenarbeit von Materiallieferanten, vertreten durch Demontage, Sortierung, Aufarbeitung und Regranulation, und Materialabnehmern, vertreten durch die Hersteller und Anwender von Kunststoffprodukten. Nur durch eine in der Produktion und Entwicklung von Primärkunststoffen bzw. in der Wirtschaft generell übliche Bedarfs- und Kundenorientierung kann es gelingen, auch für Sekundärkunststoffe einen funktionierenden Markt aufzubauen. Anreize und Unterstützung durch Öffentlichkeit und Behörden sind in der Aufbauphase notwendig.**

Auch bei optimistischer Einschätzung der Zukunft der stofflichen Verwertung wird sie kurzfristig nur für wenige ausgewählte Materialien und auch mittel- bis langfristig nur für einen Teil der Kunststoffe aus EAG sinnvoll durchführbar sein.

Die thermische Verwertung kann als Alternative all jene Kunststoffe aufnehmen, die nicht für die stoffliche Route geeignet sind. Der Einsatz in Müllverbrennungsanlagen stellt für schadstoffhaltige Fraktionen eine sichere Behandlungsvariante dar. Voraussetzung für die Realisierung dieses Verwertungsweges ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Anlagenkapazität, die aber im Zusammenhang mit der Umsetzung der Deponieverordnung in Österreich zur Verfügung gestellt werden muss.

Die Verwertungsrouten über den Einsatz als Zusatzbrennstoff in industriellen Feuerungs- und Produktionsanlagen ist Kunststoffen aus EAG prinzipiell nicht verschlossen. Für welche Teilströme und für welche Anlagen diese Verwertungsrouten geeignet ist, darüber liegen noch wenig Erkenntnisse vor.

Ungeachtet der Tatsache, dass in Österreich keine Anlagen für eine rohstoffliche Verwertung zur Verfügung stehen, stellen diese Verfahren eine Verwertungsvariante dar, die unter ökologischen Gesichtspunkten mit thermischen Verfahren konkurrenzfähig ist. Besonders Vergasungsanlagen zeichnen sich durch hohe Inputflexibilität aus, arbeiten bei sehr hohen Temperaturen mit den bekannt positiven Effekten auf die Zerstörung organischer Schadstoffe und stellen somit eine interessante Alternative zu Abfallverbrennungsanlagen dar. Die hohen Investitionskosten für derartige Anlagen sind allerdings nur bei Errichtung ausreichend hoher Anlagenkapazitäten vertretbar, sodass sich in Österreich nicht nur die Frage der Finanzierung, sondern auch die Frage der Auslastung und der ökonomischen Konkurrenzfähigkeit zur Verbrennung stellt.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) APME/VKE (1997): Feedstock Recycling of Electrical & Electronic Plastics Waste; APME technical paper
- (2) BC CONSULT (1995): Pyrocomb -Verfahren: Erprobung des Recyclings und der Entsorgung von Elektro- und Elektronikabfällen sowie flammfest ausgerüsteten Kunststoffabfällen im Technikummaßstab; Abschlussbericht (BMBF Bonn)
- (3) BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn) (2000): Leitfaden zur recyclinggerechten Produktentwicklung; Verbundprojekt PROMEKREIS Abschlussbericht
- (4) BMUJF (1999): Thermische Restmüllbehandlung in Österreich; Weißbuch
- (5) BSEF (Bromine Science and Environmental Forum) (2000): An Introduction to Brominated Flame Retardants
- (6) CHRISTILL, LAPPE, RAMLOW, SEIFERT (1999): Drehrohrpyrolyse als Verwertungsverfahren für Elektro-Altgeräte als dem Investitionsgütebereich; VDI Berichte Nr. 1288
- (7) CHRISTILL, RAMLOW (1999): Recovery of Waste Electrical & Electronic Equipment from Industrial Appliances by Pyrolysis; APME technical paper
- (8) CUHLS, SCÖNEBORN, KRAUS, JAEKEL, SCHNOOR (1999): Untersuchung von Elektrokleingeräten im Siedlungsabfall mit RFA, ICP-AES, und AAS; Müll und Abfall 12 (1999): 716-726
- (9) EHRENSTEIN, SCHUBERT : Verfahren zur kontinuierlichen Charakterisierung von Rezyklaten bei der Aufbereitung von Kunststoffen aus Elektronikschrott; BayFORREST F 129
- (10) FINK, PANNE, NIESSNER: On-line-Charakterisierung von Rezyklaten aus Kunststoffabfällen der Elektronikindustrie mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIPS); BayFORREST F 134
- (11) FINK, PANNE, THEISEN, NIESSNER, PROBST, LIN (2000): Determination of Metal Additives and Bromine in Thermoplasts from Electronic Waste by TXRF Analysis; Fresenius J. Anal. Chem. 368 (2000): 235-239
- (12) FRAUNHOFER Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (2000): Schließen von regionalen Produktkreisläufen am Beispiel eines Kunststoffteiles; Machbarkeitsstudie für das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden Württemberg
- (13) FRAUNHOFER Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung (1995): Ökobilanzen zur Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen
- (14) FRAUNHOFER Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (2000): 9. Kunststoff und Recycling Kolloquium, Kolloquiumsunterlagen
- (15) GLOTZBACH (1999): Flammhemmer in der Elektroindustrie, Sachstand – Gefährdungspotenzial – Perspektiven; Universität Witten/Herdecke
- (16) GRUNDIG AG (1990): Originäre Wiederverwertung von Kunststoffen, Abschlussbericht des Vorhabens E27 BayFORREST

- (17) GRUNDIG AG (1990): Industrieller Rückbau von Elektronik-Altgeräten in Kreisläufen; Verbundprojekt IREAK, Teilvorhaben 3: Entwicklung von flexiblen zerlege und Fraktionierprozessen zum gewinnen von definiertem Kunststoffmahlgut für originäre Wiederverwertung; Abschlussbericht
- (18) GUA (1998): Kosten Nutzen-Analyse der Kunststoffverwertung; Umweltbundesamt Wien Monographien Band 98 M-098
- (19) GUA (2000): Stoffliche Verwertung von Nicht-Verpackungskunststoffen: Kosten-Nutzen-Analyse von Maßnahmen auf dem Weg zur Realisierung einer umfassenden Stoffbewirtschaftung von Kunststoffen; Umweltbundesamt Wien, Monographien Band 124
- (20) HARRANT, HOCHHUBER, LORBER; NELLES (1996); Modellversuch zur Sammlung, Demontage und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten im Bezirk Weiz; Wissenschaftliche Begleitstudie, Informationsreihe Abfallwirtschaft der Landes Steiermark, Band 4
- (21) HARRANT, HOCHHUBER, LORBER; NELLES, ROLLAND (1998): Großversuch zur Sammlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) in der Steiermark; Wissenschaftliche Begleitstudie Informationsreihe Abfallwirtschaft der Landes Steiermark, Band 7
- (22) Technisches Büro HAUER (1999): Zusammensetzung des Hausmülls in Österreich nach Bundesländern, Auszug „Kontrolle der Restmengenziele von Abfällen an sonstigen Verpackungen für das Kalenderjahr 1998“ BMUJF
- (23) HEYDE (1997): Einsparung von Ressourcen und Vermeidung von Emissionen und Abfällen durch Verwertung von Kunststoffabfällen; Vortrag Symposium Laxenburg
- (24) IVISIC (2000): erwartetet Altgeräteaufkommen als Grundlage zur Planung von Entsorgungskonzepten; Entsorgungspraxis 4/2000, 23-26
- (25) JOHANNNEUM RESEARCH (Institut für Kunststofftechnik, Montanuniversität Leoben) (1998): Werkstoffliche Wiederverwertung von ABS Kunststoffen aus Alt-Telefonen; Abschlussbericht (Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr), Bericht aus Energie- und Umweltforschung 10/98
- (26) KIRSCH, KAISER (1997): Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Aufbereitungsanlage zur Gewinnung von Kunststoffen und Metallen aus Gebrauchsgütern; Entsorgungspraxis 12/97, 32-35
- (27) MARK, LEHNER (2000): Recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in Non-Ferrous Metal Processes, APME Technical Paper
- (28) ÖSTERR. GESELLSCHAFT FÜR SYSTEM- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK: Demontage von Elektrogeräten unter besonderer Berücksichtigung von Demontagefamilien
- (29) RIESS, ERNST, MÜLLER, POPP, VIERLE , WOLF, VAN EDLIK (2000): Analysis of Flame Retarded Polymers and Recycling Materials; Chemosphere 40 (2000): 937-941
- (30) RIESS, ERNST, MÜLLER, POPP, WOLF, VAN EDLIK: Bewertung und Optimierung von Verfahren zum Recycling flammgeschützter Kunststoffe aus der Elektrotechnik; BayFORREST F 116

- (31) RIESS, THOMA, VIERLE, VAN EDLIK (1999): Identification of Flame Retardants in Polymers using Curie Point Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectroscopy; J. Analytical and Applied Pyrolysis 53 (2000): 135-148
- (32) SALHOFER (2000): Sammlungs- und Verwertungsstrategien für Elektroaltgeräte im Vergleich; Vortragsunterlage Symposium "EU-Richtlinie über Elektroaltgeräte kommt"; Wien
- (33) SALHOFER, GABRIEL (1996): Pilotsammlung von Elektroaltgeräten in Bregenz; Wissenschaftliche Begleitstudie, BMUJF Schriftenreihe Abfallwirtschaft Band 29
- (34) SALHOFER, GABRIEL (1998): Pilotprojekt Flachgau zur Sammlung und Behandlung von Elektroaltgeräten; Studie im Auftrag der Salzburger Landesregierung, 1998
- (35) SALHOFER, GABRIEL, STUBENVOLL, HUBER (1999): Mechanische Aufarbeitung von Elektroaltgeräten, Studie im Auftrag des BMUJF
- (36) SALHOFER, GRASSINGER (1999): Sammlung von Elektroaltgeräten im Bundesland Salzburg; Wissenschaftliche Begleitstudie, Schriftenreihe des Landes Salzburg
- (37) SOFRES (1997): Information on Plastic Waste Management in Western Europe -Focus on Electrical and Electronic Equipment
- (38) UMWELTBUNDESAMT WIEN (1998): Gefährlichen Abfälle in Österreich
- (39) VEHLow, MARK (1997): Electrical & electronic plastics waste co-combustion with Municipal Solid Waste for energy recovery; APME technical paper
- (40) VKE (1998): Energetische Verwertung von Kunststoffen, Expertenworkshop Technologiezentrum Oberhausen, Dokumentation
- (41) VKE (2000): Verbrauch von Kunststoffen in der Elektroindustrie³ in Westeuropa 1998

Firmen- und Behördeninformation

Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg
Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz
Amt der Tiroler Landesregierung, Innsbruck
AVE Entsorgung, Timelkamm
BC Consult Berlin, Berlin
Baufeld Austria, Wien
BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
DKR Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH, Bad Homburg
Ecoplast Kunststoffrecycling, Wildon
Elektrorecycling GmbH, Goslar
EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, St. Gallen
FEEL, Fachverband der Elektro- und Elektronikindustrie, Wien
Fessel GfK Austria, Wien
GRUNDIG AG, Nürnberg
HER Hetzel Elektronik Recycling GmbH, Nürnberg
Höpperger Recycling, Rietz
LOAKER Recycling GmbH, Götzis
Magistrat Wien, MA 48
OKUV Osterberger Kunststoffverwertung, St. Marien
O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen AG, Linz
ROOS +PARTNER AG, Luzern
Rumpold AG, Unterprämstetten
RVL Reststoffverwertung Lenzing GmbH, Lenzing

S.EN.S Stiftung Entsorgung Schweiz, Zürich
SALYP ELV Center, Ieper (Belgien)
Sky Plastic and Commerce GesmbH, Völkermarkt
SEG Umweltservice GmbH, Mettlach
SMK Salzburger Metall & Kabelverwertung - GmbH, Bürmoos
Statistik Austria, Wien
SVZ Sekundärrohstoff Verwertungszentrum Schwarze Pumpe, Spreetal/Spreewitz
SWICO, Schweizer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations-
und Organisationstechnologie, Zürich
Trienekens AG, Grevenbroich
UHF Umweltforum Haushalt, Wien
Umweltdienst Burgenland, Oberpullendorf
USG Umweltservice GmbH, Korneuburg
Welser Kunststoff Recycling WKR GmbH, Wels
ZME Elektronik Recycling GmbH, Heuchelheim