

Beihefte zu

**Müll
und
Abfall**

Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen
Organ für die gesamte Entsorgung und Abfallwirtschaft



27

Recycling von Kunststoffabfällen

Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage

Von Dipl.-Ing. Georg Härdtle, Dipl.-Ing. Klaus Marek,
Dr.-Ing. Bernd Bilitewski und Dipl.-Ing. Kristian Kijewski

Beihefte zu

Müll und Abfall

Fachzeitschrift
für Behandlung und
Beseitigung von Abfällen

Organ für die
gesamte Entsorgung
und Abfallwirtschaft

In unregelmäßiger Folge
erscheinen zur Fachzeitschrift
MÜLL und ABFALL Beihefte,
in denen jeweils ein aktuelles
Thema ausführlich und von kom-
petenter Seite behandelt wird.

Abonnieren auch Sie die Beihefte!
Sie sichern sich damit nicht nur
den prompten Bezug gleich nach
Erscheinen, sondern Sie nutzen
auch den günstigen Abonnements-
preis

Erich Schmidt Verlag
Berlin · Bielefeld · München

Neuaufgabe

Beiheft 30

Bauschutt- und Asphaltrecycling

Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit

Von Dr.-Ing. Bernd Bilitewski, Dipl.-Ing. Klaus Marek, Dipl.-Ing. Georg Härdtle
und Dipl.-Ing. Angela Gewiese (alle bei intecus Ingenieurgemeinschaft für
Technischen Umweltschutz, Berlin)

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage, 96 Seiten, DIN A 4, kartoniert, Preis für Abon-
nenten der Beihefte DM 62,-, im Einzelbezug DM 68,-, ISBN 3 503 03115 4

In den letzten Jahren hat das Recycling von Baurestmassen wieder eine erhebliche ökonomische
und ökologische Bedeutung gewonnen, so daß hier eine Wachstumsbranche entstand. Gegenüber
der Voraufgabe werden in dieser Neuaufgabe vertieft die rechtlichen Grundlagen der technischen
Anlagen und Verfahren, der Einsatzmöglichkeiten der Produkte sowie die Umweltauswirkungen des
Bauschutt- und Asphaltrecycling dargestellt.

Insgesamt fallen allein in der Bundesrepublik Deutschland jährlich über 125 Mio. t, als Baurestmas-
sen an. Bisher wird ein Anteil von ca. 4 Gew.-% in den über einhundert Bauschutt-Aufbereitungsan-
lagen aufbereitet, so daß sich hier noch große Chancen für die Zukunft auftun. Zusätzlich werden
jährlich 10-15 Mio. t Asphalt ausgebaut und dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung
gestellt.

**Bauschutt- und Asphaltrecycling zeigt die Möglichkeiten der Gewinnung, der
Aufbereitung und des Einsatzes von Bauschutt und Straßenaufbruch auf.
Diese Neuaufgabe wird den verantwortlichen Fachleuten in Gemeinden, Städ-
ten und Kreisen, in Genehmigungsbehörden, Planungsbüros, bei den Bau-
stoffhändlern und den Unternehmen des Baugewerbes eine aktuelle, aus-
führliche und umfassende Arbeitsgrundlage für den Einsatz von Bauschutt-
und Asphaltaufbereitungsanlagen an die Hand geben.**

Aus dem Inhalt

Einleitung

Aufkommen und Charakterisierung von
Baurestmassen
Erdaushub
Bauschutt
Straßenaufbruch
Baustellenabfälle
Produktion mineralischer Rohstoffe und
Anfallmengen der Baurestmassen

Stand der Verwertung und Entsorgung
Deponierung von Baurestmassen
Verwertung von Baurestmassen

Genehmigungsverfahren von Anlagen zur
Aufbereitung von Baurestmassen
Genehmigungsverfahren von Anlagen zur
Aufbereitung von Asphalt

Technische Grundlagen und Verfahren

Erdaushub
Bauschuttaufbereitung
Anlagentypen (mobil/semimobil/statio-
när)
Verfahrenstechnische Komponenten von
Bauschuttrecyclinganlagen
Zerkleinerungsaggregate
Siebanlagen
Transporteinrichtungen
Magnetscheider
Abscheidung von unerwünschten
Bestandteilen

Naßsichtung
Trockensichtung

Betriebserfahrungen, ausgewählte Bei-
spiele

Asphaltaufbereitung
Recycling-in-place
Recycling-in-plant
Betriebserfahrungen

Sortierung von Baustellenabfällen

Produkte und Eigenschaften

Bauschutt
Anforderungen
Einsatzgebiete

Umweltbeeinträchtigungen

Lärmbelästigungen
Luftverunreinigungen
Bauschutt
Asphalt
Wassergefährdung und Landschaftsver-
brauch
Gewinnung von Rohstoffen
Anwendung des aufbereiteten Materials
Deponierung von Reststoffen

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Bauschuttrecycling
Asphaltrecycling

Ausblick

KaJo Kunststoff GmbH

Wir entsorgen Ihre Kunststoffe
(PVC – PE – PS – PP – PA – ABS)
– auch in Form von Abfällen –
schnell, kostengünstig, europaweit

- Eigene Fertigung von Profilen aus Recyclingmaterial
- Extrusion und Spritzgießen
- Feinmahlung / Granulierung

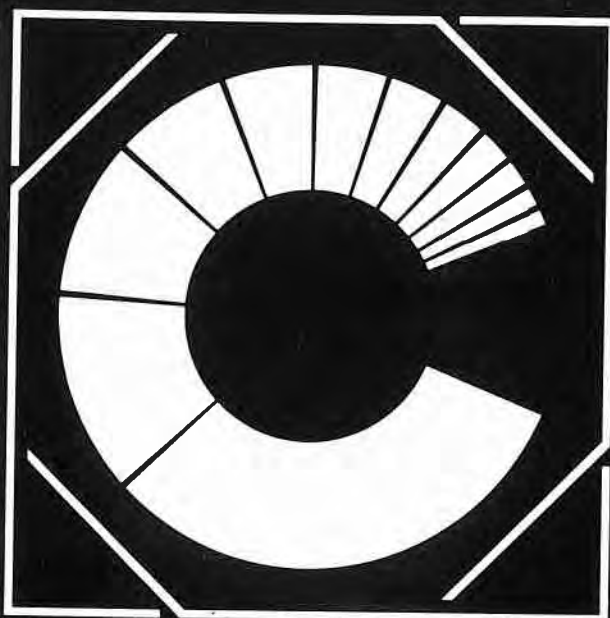
W-3470 Höxter 1

Postfach 100312
Tel. (05271) 0 3945 · FAX (05271) 35237

HANSA- KUNSTSTOFF- RECYCLING

**Abholung und
Verwertung von
thermoplastischen
Kunststoffabfällen
ABS · PS · SAN · PC
PMMA**

Waldhofstraße 25 · 2087 ELLERBEK
☎ 04101/33031-32 · Fax 04101/34182



CALENBERG

F E I N S T E S

K O M M T

Z U R Ü C K

L O H N M A H L U N G 3017 PATTENSEN 5 · OT SCHULENBURG
ZERKLEINERN · MISCHEN · SIEBEN TEL.: 05069/3068-69 · FAX: 05069/3067

UMWELT- PROBLEME?

Lösungen durch

intecus

Berlin · Hamburg · Freiburg
Ingenieurgemeinschaft für
technischen Umweltschutz

Stieffring 7 · 1000 Berlin 13 · Tel: 030/345 10 35 · FAX: 030/344 83 15

Unsere Umwelt verdient aktive Beiträge zum Kunststoffrecycling – wir bieten sie.

Eine besondere Herausforderung unserer Zeit sind die Fragen der Verwertung von Kunststoffen. WKR, ein Unternehmenszweig der Jakob Becker KG, antwortet darauf und bietet Ihnen eine Palette von Altkunststoffprodukten. Sprechen Sie mit uns, wenn es um Elemente für Lärmschutzwände, Parkbänke und Tische, Verkehrsinseln, Palisaden, Blumenkästen, Gartenkomposter oder die Umsetzung Ihrer individuellen Wünsche geht. Wir sind nicht nur auf der Entsorga '91 (Stand 154) für Sie da.

WKR Altkunststoffproduktions- und Vertriebsgesellschaft mbH.
Klosterstr. 22, 6520 Worms, Telefax 0 62 41/2 85 49, Telefon 0 62 41/69 31-32



VERNUNFT ÜBERZEUGT

Kunststoff-Abfälle wie gebrauchte, verschmutzte Folien, Kanister und andere Formen in PE, PP, PS und ABS **sind unsere Rohstoffe.**

Wir waschen, sortieren und regranulieren zu ökologisch und ökonomisch sinnvollen **Qualitäts-Regranulaten** für Folien, Rohre und Spritzguss.

POLY RECYCLING AG
CH-8570 Weinfelden **Telefon 072 22 24 44**

Neuauflage

Leitfaden Abfallrecht

Ein Ratgeber für Betriebsbeauftragte für Abfall, Entsorger und Verwaltung
mit den Texten aller Bundesgesetze und -verordnungen sowie Allgemeinen Verwaltungsvorschriften
von Dr. Henning v. Köller

3., aktualisierte und erweiterte Auflage, XV, 387 Seiten, DIN A 5, kartoniert, DM 39,80, ISBN 3 503 03247 9
Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 34

Das Abfallrecht wurde erheblich geändert und ändert sich fortlaufend weiter, zuletzt mit der Verpackungsverordnung. Die 1986 verankerten Grundsätze der Abfallvermeidung und Abfallverwertung werden konkretisiert. Bereits an der Quelle setzen das Reststoffvermeidungs- und -verwertungsgebot an. Der **Leitfaden Abfallrecht** stellt diese Rechtsänderungen in den Rahmen des bisher geltenden Rechts, erläutert die Begriffe Abfall, Reststoff, Wirtschaftsgut und nennt die Voraussetzungen der Abfallvermeidung und -verwertung. Er charakterisiert die TA Abfall in ihren Rechtswirkungen, stellt die Funktionsweise von Entsorgungsnachweis, Transportgenehmigung und Begleitschein dar, geht auf die Altlastensanierung ein und beschreibt die Rechte und Pflichten eines Betriebsbeauftragten für Abfall sowie die zivil- und strafrechtliche Haftung für durch Abfälle verursachte Schäden.



Erich Schmidt Verlag

Berlin · Bielefeld · München

Recycling von Kunststoffabfällen

Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit

Von Dipl.-Ing. Georg Härdtle,
Dipl.-Ing. Klaus Marek, Dr.-Ing. Bernd Bilitewski und
Dipl.-Ing. Kristian Kijewski

2., neubearbeitete und erweiterte Auflage

ERICH SCHMIDT VERLAG

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling von Kunststoffabfällen: Grundlagen – Technik –
Wirtschaftlichkeit / von Georg Härdtle ... – 2., neubearb. und
erw. Aufl. – Berlin: Erich Schmidt, 1991

(Beihefte zu Müll und Abfall; H. 27)

ISBN 3-503-03248-7

NE: Härdtle, Georg; Müll und Abfall / Beihefte

Bild auf dem Umschlag:
Kunststoffabfälle aus Hausmüll

ISBN 3 503 03248 7

Alle Rechte vorbehalten

2. Auflage 1991

© Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin 1988

Druck: Regensburg, Münster

Geleitwort

Die positive Aufnahme der ersten Auflage des „Recycling von Kunststoffabfällen“, die sich zum Teil überstürzen- und überschneidenden Entwicklungen bei der Forschung und in der Praxis und die organisatorischen und gesetzgeberischen Maßnahmen zum Recycling der Kunststoffe, waren die wichtigen Gründe für die Erstellung der 2. Auflage. Das gesamte Geschehen beim Kunststoffrecycling hat sich nämlich intensiviert und eine schnellere Gangart zugelegt. Es ist unübersichtlicher und vielfältiger geworden.

Um so schwieriger ist es, die verschiedenen Entwicklungen, Maßnahmen und Vorstellungen, die gegenüber den Praxisdurchführungen noch wesentlich überwiegen, einzuordnen und in ihrer Beurteilung für die zukünftige Recyclingentwicklung abzuschätzen. Das vorliegende Beiheft gibt dem Leser die Möglichkeit einer umfassenden Überblicksinformation, die allerdings nicht in der Lage ist, alle weiteren Entwicklungen nun vorauszusagen. Dies können aber die auf dem Gebiet Tätigen auch nicht, und daher ist es für jeden, der auf dem Kunststoff-Recycling-Gebiet arbeitet, nützlich, diesen Überblick aus den verschiedenen Gebieten, die in der Entwicklung des Recyclings in der Praxis zusammenspielen, kennenzulernen.

Zwei neue Kapitel heben diesen Überblick über das Niveau der üblichen technischen Darstellungen. Kapitel 2 über die rechtlichen und organisatorischen Grundlagen zeigt, welche Bemühungen der Gesetzgeber und die öffentlichen Stellen unternehmen, um das Recycling zu kanalisieren und zu aktivieren. Die Bedeutung der Logistik wird in dem Kapitel 4 über produkt- und branchenbezogene Sammlung und Verwertung klar. Gerade die vielen unterschiedlich durchgeführten Sammlungen und die Überlegungen der Verwertung zeigen, daß es sehr differenzierter Betrachtungsweisen bedarf, um die jeweiligen Produkte wirtschaftlich zu erfassen und zu verwerten, wobei die gezielte Sammlung und Erfassung einer der wichtigen Ausgangspunkte ist. Erst durch einen entsprechenden zeitlich konstanten Mengenanfall und möglichst einheitliche Sammelprodukte wird die Wirtschaftlichkeit einer Recyclingmaßnahme garantiert.

Es wird beschrieben, daß sich der Kunststoffeinsatz und der Abfallanfall in den nächsten zehn Jahren größenordnungsmäßig verdoppeln werden. Die im Buch gebrachten Recyclinglösungen können noch nicht erkennen lassen, wie die stark zunehmenden Kunststoffabfälle im einzelnen wieder dem Werkstoffkreislauf zugeführt werden. Sie lassen aber darauf schließen, daß die Hoffnung einiger Technikgegner, durch die Schwierigkeit, das Recycling von Kunststoffabfällen in die Hand zu bekommen, der Kunststoff durch Ersatzstoffe und andere Maßnahmen auf den verschiedenen Gebieten zurückgedrängt wird, sich nicht erfüllen wird. Kunststoffrecycling ist von der Technik und auch von der Einordnung hinsichtlich der Rechtssituation und der Organisationsformen im Umbruch. Dieser Umbruch wird durch die verschiedenen Darlegungen in diesem Heft schon deutlich sichtbar, während er in der 1. Auflage noch nicht erkennbar war. Er wird begleitet durch die Rückwirkung des Recyclings auf die Kunststoffherstellung und die Kunststoffverarbeitung. Auf letztere insbesondere dadurch, daß die Produkte, z. B. die Verpackungen, durch gezielten Kunststoffeinsatz und recyclinggerechte Konstruktion kostengünstiger und wirkungsvoller werden. Der wiedergewonnene Kunststoff wird durch das zukünftige umfangreichere Kunststoffrecycling einen Teil des Ölverbrauchs, der sonst für die Herstellung neuer Kunststoffe nötig wäre, überflüssig machen.

Abfall entsteht beim Verbraucher, und es ist daher auch die Aufgabe von allen, die auf dem Recyclinggebiet tätig sind, auf eine Änderung unserer Einstellung als Verbraucher gegenüber den Kunststoffprodukten hinzuwirken. Dies muß in der Weise geschehen, daß sie richtig eingesetzt werden und durch Unterstützung der Erfassung in den Kunststoffkreislauf wieder zurückgeführt werden. Wenn dies gelingt, werden die Kunststoffe unsere Lebensbedingungen verbessern und dazu beitragen, unsere Umwelt und unsere Ressourcen zu schonen. Dieses Ziel kann die 2. Auflage des „Recyclings von Kunststoffabfällen“ mitbewirken.

Juni 1991

H. Käufer, o. Professor

Danksagung

Die Autoren der vorliegenden Arbeit danken für die hilfreiche, inhaltliche Mitarbeit von Frau Petra Rüffer und Frau Dipl.-Ing. (FH) Inge Gladitz-Funk sowie dem Sekretariats- und Zeichenteam der Fa. INTECUS für die redaktionelle Bearbeitung.

Dr.-Ing. Bernd Bilitewski

Dipl.-Ing. Georg Härdtle

Dipl.-Ing. Kristian Kijewski

Dipl.-Ing. Klaus Marek

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9	5	Grundlagen und Probleme	52
1.1	Definition von Kunststoffen	9	5.1	Einfluß von Verunreinigungen auf die Wiederverwertung	52
1.2	Die häufigsten Kunststoffarten	9	5.2	Einfluß von Kunststoffmischungen auf die Wiederverwertung	52
1.3	Produktion und Verbrauch von Kunststoffen	11	5.3	Kunststoffe in Verbundprodukten und deren Wiederverwertung	54
1.4	Definition und Charakterisierung der Kunststoffabfälle	15	5.4	Additive in Kunststoffen und deren Auswirkung auf das Recycling	55
1.5	Kunststoffabfälle aus Haushalten und Gewerbe	15	6	Maßnahmen zur Optimierung	57
1.6	Umweltauswirkungen durch die Abfallentsorgung	19	6.1	Recycling von Kunststoffen aus komplexen Altprodukten	57
1.6.1	Deponie	20	6.2	Kennzeichnung von Kunststoffen	57
1.6.2	Müllverbrennung	20	6.3	Qualitätskriterien von Sekundärkunststoffen	59
2	Rechtliche und organisatorische Grundlagen	22	6.3.1	Materialprüfung	59
2.1	Rechtliche Grundlagen für die Sammlung und Verwertung von Kunststoffen aus Haushaltsabfällen	22	6.3.2	Materialeigenschaften	60
2.1.1	Verpackungsverordnung	22	6.3.3	Mikroskopische Materialprüfung	61
2.1.2	Technische Anleitungen, Vorschriften	24	6.3.4	Qualitätsstandards für Sekundärstoffe	61
2.2	Organisatorische und logistische Maßnahmen	24	6.4	Entwicklung und Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen	61
2.2.1	Duales System zur Wertstofferrfassung	24	6.5	Substitutionsmöglichkeiten von halogenierten Thermoplasten	66
2.2.2	Initiativen und Verbände zur Förderung des Kunststoffrecyclings	27	6.6	Direkte Wiederverwertung von Duroplastabfällen	67
3	Sammlung von Kunststoffabfällen	30	7	Technische Grundlagen und Verfahren	68
3.1	Vermittlung durch Abfallbörsen	30	7.1	Zerkleinern	69
3.2	Sammlung von Kunststoffabfällen aus Haushalten	30	7.2	Klassieren	71
3.2.1	Holsystem	31	7.2.1	Sieben	71
3.2.2	Bringsystem	33	7.2.2	Sichten	71
3.3	Beispiele für die Sammlung von Kunststoffen aus Haus- und Gewerbeabfällen	34	7.3	Sortierung	72
3.3.1	Sammlungen in der Bundesrepublik Deutschland	34	7.3.1	Dichtesortierung	72
3.3.2	Sammlungen in anderen Ländern	38	7.3.2	Flotation	74
4	Produkt- und branchenbezogene Sammlung und Verwertung	40	7.3.3	Elektrostatische Sortierung	74
4.1	Kunststoffe im Automobilbau	40	7.3.4	Automatische Klauerverfahren	75
4.1.1	Aktuelle Situation und Prognosen	40	7.4	Schmelze	75
4.1.2	Behandlungsmöglichkeiten des Shredderleichtmülls	43	7.4.1	Granulieren	75
4.1.3	Initiativen der Industrie	43	7.4.2	Extrudieren	75
4.1.4	Lösungsansätze zur Verbesserung der Shredderreststoffsituation	43	7.4.3	Schäumen	76
4.1.5	Gesetzgebung	44	7.4.4	Spritzgießen	76
4.1.6	Entsorgung von Duroplast-Karosserien	45	7.4.5	Pressen	77
4.2	Kunststoffe in Verbundverpackungen für Getränke	46	7.4.6	Abluftbehandlung	77
4.3	Beispiele für produkt- und branchenbezogene Sammlung und Verwertung	48	7.4.6.1	Chemische Grundlagen der Abluftbehandlung	77
			7.4.6.2	Verfahrensbeschreibung	78
			7.5	Pyrolyse	79
			7.5.1	Produkte und Eigenschaften	79
			7.5.1.1	Pyrolyseruß oder -koks	80
			7.5.1.2	Pyrolyseöl	80
			7.5.1.3	Pyrolysegas	80
			7.5.2	Pyrolyse verschiedener Altkunststoffstoffe	81
			7.5.2.1	Sortenreine Kunststoffabfälle	81
			7.5.2.2	Gemischte Kunststoffabfälle	82
			7.5.2.3	Verunreinigte Kunststoffabfälle	83

7.5.2.4	Altreifen	83	8	Aufbereitungsverfahren	91
7.5.3	Pyrolyseanlage ABB	83	8.1	Amberger Kaolinwerke	91
7.5.4	Partielle Oxidation	83	8.2	Entec Verfahren	93
7.5.5	Wirtschaftlichkeit	84	8.3	REFAKT Anlagenbau	96
7.6	Hydrierung	84	8.4	Thyssen Henschel	98
7.6.1	Einsatzprodukte	85	8.5	REAL	98
7.6.2	Produkte	85	8.6	Recycloplast	101
7.6.3	Verfahrensablauf	86	8.7	RGR	102
7.6.4	Vergleich Pyrolyse/Hydrierung	86	8.8	Wormser Kunststoffrecycling	102
7.7	Hydrolyse	87	8.9	Zusammenstellung der Verfahren	103
7.7.1	Hydrolyse von Schaumstoffabfällen	87	8.10	Weitere Verfahren	104
7.7.2	Produkte und Eigenschaften	88			
7.8	Alkoholyse	89	9	Ausblick	108
7.8.1	Verfahrenstechnik	89			
7.8.2	Übertragung in industriellen Maßstab	89	10	Literaturverzeichnis	111
7.8.3	Endprodukt	90			

1. Einleitung

In der Bundesrepublik wurden 1989 ca. 9 Mio Mg Kunststoffe produziert. Ein Teil davon wurde in synthetischen Fasern, Farben, Lacken, Klebstoffen u. ä. verbraucht. Ein weiterer Teil wurde exportiert. 1989 betrug der Ausfuhrüberschuß 6.756 Mio DM; die Einfuhr belief sich auf 56,1 % der Ausfuhr. Das mittlere Wachstum der Branche beträgt im Mittel 9 % pro Jahr. Schätzungen sagen für das Jahr 2000 den Produktionsanstieg auf rund 20 Mio Mg voraus [41, 87].

Rund 2,2 Mio Mg fallen als Kunststoffabfälle zur Entsorgung an, das entspricht rund 7 % des Haus- und Gewerbeabfalls. Die Differenz zwischen Produktions- und Abfallmenge bedeutet einen ständigen Zuwachs an Produkten, die erst zukünftig als Abfall zu behandeln sind.

Das Recycling von sortenreinen und unverschmutzten Kunststoffen aus der Kunststoffherzeugung und -verarbeitung sowie einigen „kunststoffverbrauchenden“ Industrien (Handel, Getränke, Landwirtschaft) beträgt nach mehrjähriger kontinuierlicher Zunahme nun etwa 500.000 Mg/a. In diesem Bereich werden die nicht verunreinigten Einkomponentenfraktionen nach Regranulierung zu 75 %, insgesamt 250.000 Mg, in den Produktionsprozeß zurückgeführt.

Seit etwa vierzehn Jahren gibt es Bemühungen, auch Kunststoffe aus Hausmüll zu separieren und einer Verwertung zuzuführen. Wesentliche Hemmnisse sind dabei die Vielfalt der Kunststoffarten und die Verschmutzung der Kunststoffe.

Während der Preis von Neu-Kunststoff von den Schwankungen auf dem Ölmarkt bestimmt wird, ist der Preis von Recyclingprodukten insbesondere abhängig von der Ökonomie des Recyclingverfahrens. Um diese Produkte noch ökonomisch attraktiv zu gestalten, muß ihr Preis um 20–30 % unter dem Neupreis liegen [149].

1.1 Definition von Kunststoffen

Kunststoffe sind makromolekulare Stoffe, die ganz oder teilweise aus organischen Verbindungen aufgebaut sind. Diese werden entweder synthetisch aus einfachen organischen Stoffen hergestellt (z. B. Alkohol, Benzol, Methan) oder aus komplexen, in der Natur vorkommenden Grundstoffen (z. B. Kautschuk) aufgebaut.

Die synthetischen Kunststoffe werden durch chemische Verknüpfung (Polymerisation) kleiner, in der Natur vorkommender Moleküle (Monomere) gewonnen. Rohstoffe sind unter anderem Erdöl, Erdgas, Kohle, Wasser, Sand, Kalk und Stickstoff.

Bei der Herstellung von Kunststoffen aus natürlichen Grundstoffen werden diese chemisch abgewandelt. Als Rohstoffe kommen Naturkautschuk, Eiweiß, Zellulose und Naturharze in Frage.

Beide Gruppen bestehen im wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff. In einzelnen Kunststoffarten können als Nebenbestandteile Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor und Fluor enthalten sein. Außerdem werden eine Vielzahl von chemischen Elementen und Verbindungen zur Erzielung spezieller Eigenschaften zugesetzt.

1.2 Die häufigsten Kunststoffarten

Beruhend auf den Eigenschaften der Polymere werden die Kunststoffe in drei Hauptgruppen unterteilt:

- Thermoplaste,
- Duroplaste,
- Elastomere.

Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus linearen oder verzweigten, aber nicht in ihren Polymerketten vernetzten Polymeren (Ketten von Monomeren), die beim Erwärmen reversibel bis zur Fließfähigkeit erweichbar sind. Beim Abkühlen kommt es zur Verfestigung der Materialien. Sofern keine chemische Schädigung durch übermäßige thermische Beanspruchung entstanden ist, können Thermoplaste mehrfach regeneriert und erneut über die Schmelze verarbeitet werden. Wiederholte Umschmelzprozesse können eine Veränderung der Eigenschaften hervorrufen.

Die ersten synthetischen Kunststoffe, die im Gegensatz zu den abgewandelten Naturstoffen aus niedermolekularen Ausgangsstoffen hergestellt wurden, waren Duroplaste. Duroplaste entstehen durch die Reaktion fließfähiger, niedermolekularer Vorprodukte, die bei der Formgebung miteinander vermischt werden und durch chemische Reaktion zum Fertigprodukt aushärten. Die Härte der fertigen Duroplaste ist bis zu den Grenztemperaturen des thermo-chemischen Abbaus der Polymere wenig veränderlich. Duroplaste sind irreversibel ausgehärtet und thermisch nicht regenerierbar.

Elastomere Kunststoffe sind dauerelastische Kunststoffe, die aus weitmaschig vernetzten Polymeren aufgebaut sind. Bei Raumtemperatur sind diese weich und gummielastisch. Je nach Temperaturstabilität wird in chemisch vernetzte und in thermoplastische Elastomere unterschieden. Elastomere sind wie Duroplaste nicht schmelzbar.

Von diesen Hauptgruppen können nur Thermoplaste mehrfach geformt werden, so daß auch nur bei dieser Gruppe eine direkte Wiederverwertung durch erneute Einschmelzung möglich ist. Die übrigen Gruppen können nur thermisch verwertet (Pyrolyse, Verbrennung) oder nach Zerlegung in die Ausgangsstoffe stofflich recycelt werden. Die wesentlichen Kunststoffarten werden nachfolgend kurz charakterisiert (Tabelle 1.1).

Polyolefine (PO) sind Polymerisate des Ethens und anderer aliphatischer Kohlenwasserstoffe, die als Monomere eine endständige Doppelbindung besitzen.

Tab. 1.1: Einsatzbereiche und chemische Formeln von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren

Kunststoff	Kürzel	Chemische Formel	Einsatzbereiche
<u>Thermoplaste</u>			
Polyethylen	PE	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Folien, Formkörper, Massenartikel
Polyethylenterephthalat	PETP	$-\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O} \right]_n-$	verschleißfeste Elemente der Feinwerktechnik, Gerätegehäuse, Folien
Polybutylenterephthalat	PBTP	$-\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O} \right]_n-$	Gleitlager, Laufrollen, Gehäuse für Zündkerzen
Polypropylen	PP	$\left[\text{CH}-\text{CH}_2 \right]_n$ $\quad \quad \quad $ $\quad \quad \quad \text{CH}_3$	techn. Teile, z.B. im KFZ
Polyvinylchlorid	PVC	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}}-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}}-$	Folien, Fensterrahmen, Rohre, Kabelisolierung
Polystyrol	PS	$\left[\text{CH}-\text{CH}_2 \right]_n$ $\quad \quad \quad $ $\quad \quad \quad \text{C}_6\text{H}_5$	Einwegbecher, glasklare Haushaltgegenstände, Spritzgußteile, Styropor
Polyamid	PA	$-\left[\text{NH}-(\text{CH}_2)_n-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-(\text{CH}_2)_m-\text{C}(=\text{O}) \right]_n-$ Polyamid 612	Zahnräder, Faserstoffe, Mauerdübel, Elektrogehäuse
Polycarbonat	PC	$-\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O}) \right]_n-$	Compact-Discs, Rundstäbe, Flaschen, Ampullen
<u>Duroplaste</u>			
Polyester	UP	$-\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O} \right]_n-$	Gießharz, Lacke, Spachtelmassen
Epoxidharz	EP	$-\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_2)_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O} \right]_n-$	Lacke, Gießharz, Klebstoffe
Phenolharz	PF	$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OH}$	el. Isolierstoffe, Hartfaserplatten, Gieß- und Lackharze, Holzleim, Auto-Karosserieteile (Trabant)
Melaminharz	MF	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_3(\text{NH}_2)_2-\text{N}_3$ Hexamethylolmelamin	Bindemittel für Preßmassen, Holzleim, Lacke
Harnstoffharz	UF	$\text{O}=\text{C}-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{OH}$ Dime-thylol-harnstoff	Bindemittel für Preßmassen, Holzleim, Lacke
Polyurethan	PUR	$-\left[(\text{CH}_2)_6-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{NH}-(\text{CH}_2)_4-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-\text{O} \right]_n-$	Gieß- und Streichmassen, Schaumstoffe, Lacke
<u>Elastomere</u>			
Naturkautschuk	NR	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2-$	Weich- und Hartgummi, Schläuche, Dichtungen
Styrol-Butadien-Kautschuk	SBR	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2)-$	Autoreifen
Polybutadien	BR	$-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2-$	Autoreifen, Auskleidungen, Isoliermaterial
Polychlorpropen	CR	$-\text{CH}=\underset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{C}}}-\text{CH}=\text{CH}_2-$	Förderbänder, Kabelummantelung, Schaumgummi, Schutzkleidung

Die Hauptvertreter der Polyolefine sind das Polyethylen (PE) und das Polypropylen (PP). Bei PE wird zusätzlich je nach dem Druck, unter dem die Polymerisation stattfindet, in HD-PE (high density) und LD-PE (low density) unterschieden.

Zu den Polyolefinen zählen auch Polyethylterephthalat (PETP oder PET) und Polybutylterephthalat (PBTP), die u. a. als glasklare Getränkeverpackungen bzw. im Automobilbau Verwendung finden. PETP und PBTP sind lineare Polyester und werden seit 1947 aus bifunktionellen Ausgangsstoffen hergestellt. Bedeutung erlangte PETP weltweit als Textilfaser (Diole, Trevira). Die technischen Eigenschaften Steifheit, Stärke, Berstdruckfähigkeit, chemische Beständigkeit und Klarheit führen zu zunehmender Verwendung für Hohlkörper, Folien etc. Die Gasdurchlässigkeit ist größer als bei Glas, die Kunststoffe sind für kohlensäurehaltige Getränke daher nur bedingt geeignet.

Polyvinylchlorid (PVC), seit 1957 auf dem Markt, gehört zur Gruppe der halogenierten Polymere. Als einziger Kunststoff besteht PVC nur etwa zur Hälfte aus Erdölabbkömmlingen. Der Anteil von Chlor beträgt 57 %, der von Erdölprodukten 43 %. Knapp 30 % des in der Bundesrepublik hergestellten Chlors wird für die Herstellung von PVC verwandt; Chlor-Lieferant ist Salz. Zur Gewährleistung der vielfältigen Anwendungen müssen dem PVC unterschiedlichste, größtenteils umweltgefährdende Additive zugemischt werden (vgl. Kapitel 5.3).

Für das Material sprechen seine vielfältig zu variierenden Eigenschaften, gute Verformbarkeit als thermoplastisches Material und sein günstiger Preis. Gegen das Material sprechen die vielfältigen Emissionen und Gefahrenmomente, die von den über 1.000 möglichen, während des komplizierten Herstellungsprozesses zu Anwendung kommenden, z. T. toxischen und kanzerogenen Chemikalien ausgehen. Neben anderen Zusatzstoffen verursachen die im PVC eingebundenen Schwermetalle (Cadmium, Blei) und Weichmacher (Gew.-Anteil bis zu 50 %) bei der Entsorgung schwer und aufwendig lösbare Umweltprobleme. Bei der Verbrennung und Aufbereitung (z. B. von Elektrokabeln) tragen PVC-Produkte zur Bildung von Dioxinen und Furanen bei.

Erheblich sind die Gefahren die bei Gebäudebränden von PVC-Produkten (Bodenbeläge, Vinyltapeten, Kabelummantelungen, Fensterprofile) ausgehen: hierbei entstehen neben Salzsäure Dioxine und Furane. Unproblematisch ist der Einsatz von PVC-Rohren im Tiefbau mit nur geringem Brandrisiko, wenn die Umweltprobleme bei Herstellung und Entsorgung von PVC nicht in die Beurteilung miteinbezogen werden. Aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihres Preises werden PVC-Produkte für die Bereiche Rohre, Fensterprofile und Hohlkörper auch in Bezug auf die Umweltverträglichkeit als konkurrenzlos angesehen. Die Substitution z. B. bei Fensterprofilen durch Holz oder Aluminium gilt nicht als echte Alternative. Dem Einsatz von Tropenhölzern steht der Schutz der Regenwälder entgegen, heimische Hölzer müssen imprägniert und regelmäßig lackiert werden, die Herstel-

lung von Aluminium ist vor allem mit einem hohen Energiebedarf verbunden.

Bei der Benennung des Preisvorteils von PVC gegenüber anderen Kunststoffen und anderen Materialien werden jedoch die enorm hohen Entsorgungskosten von mindestens 500,- DM/Mg verbranntem PVC und die nicht im Einzelnen quantifizierbaren Kosten der Umweltgefährdung und -schädigung durch die mit der PVC-Produktion verbundenen Chemikalien vernachlässigt (siehe dazu 1.6, 5.3).

Polystyrol (PS) ist der älteste durch Additionspolymerisation als Kettenreaktion gewonnene Thermoplast. PS besteht aus einer Hauptkette und Phenylringen, die als Polymer eine Einheit bilden. Durch Aufschäumen entsteht expandierbares Polystyrol (EPS), das unter der Produktbezeichnung Styropor als Verpackungsmaterial Verwendung findet.

In den linearen Basismolekülen der hochpolymeren **Polyamide (PA)** sind in regelmäßigen Abständen die Carbonsäureamid-Gruppen (CONH-Gruppe) enthalten, die das Grundverhalten der vielfältig anwendbaren PA bestimmen.

Lineare Polyester aus aliphatischen Dicarbonsäuren (z. B. Adipinsäure) können wegen des niedrigen Erweichungsbereiches nicht direkt verwendet werden. Sie dienen zur Herstellung vernetzter Polyester (UP) und als Weichmacher für PVC. Als Textilfaser oder Formmassen haben die linearen Polyester der Terephthalsäure technische Bedeutung erlangt.

Um die Eigenschaften und damit die Einsatzgebiete der einzelnen Kunststoffarten zu variieren, werden den chemischen Grundstoffen unterschiedliche Hilfsstoffe zugegeben. Somit besteht die Möglichkeit, ganz gezielt den jeweiligen Anforderungen entsprechend Kunststoffe herzustellen. Diese Beimischungen werden ganz allgemein als „Additive“ bezeichnet (vgl. Kapitel 5.3). Die meisten Anwendungszwecke erfordern vielseitig, stoffspezifisch aufgebaute Hilfsstoffsysteme. Neben der dauernden Verträglichkeit der einzelnen Bestandteile untereinander und gegenüber den Polymeren, sind auch sicherheitstechnische, gewerbehygienische und toxikologische Auflagen (insbesondere im Bereich der Lebensmittelindustrie) zu beachten.

Die genauen Rezepturen der über 1.000 verschiedenen Additive sind aus Wettbewerbsgründen nicht bekannt. Eine Einschätzung des Gefährdungspotentials ist daher nur für wenige (z. B. Cadmium, Blei, Weichmacher) möglich. Besonders bedenklich sind Organometall- und Schwermetallverbindungen in Stabilisatoren, schwermetallhaltige Pigmente und Azofarbstoffe, Phosphorsäureesterabbkömmlinge (Nervengas, Kampfstoff, Insektizide) in Weichmachern und Flammenschutzmitteln aus Bromverbindungen. Herstellung, Verwendung, Verwertung und Beseitigung bergen ein hohes Risiko. Für nahezu die Gesamtheit der Additive bestehen große Kenntnislücken über das Auftreten und die Wirkung dieser Stoffe auf Mensch und Umwelt [69].

1.3 Produktion und Verbrauch von Kunststoffen

Die Bundesrepublik Deutschland ist nach den USA

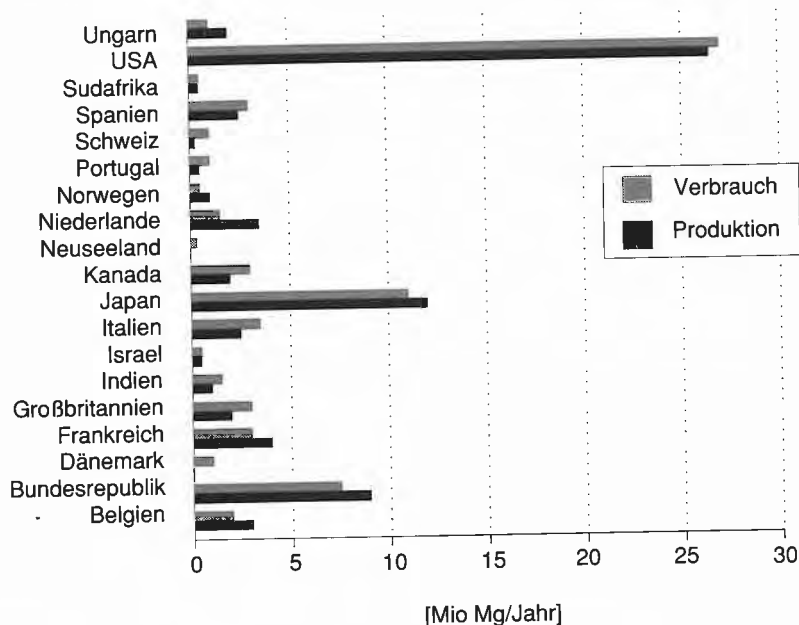


Bild 1.1: Produktion und Verbrauch von Kunststoffen 1989 in ausgewählten Ländern [41]

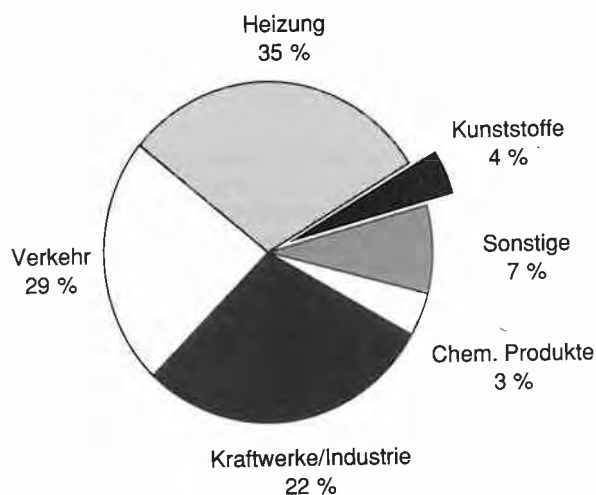
und Japan der weltweit drittgrößte Produzent und Verarbeiter von Kunststoffen. Der Umsatz an Kunststoffserzeugnissen betrug 1989 in ausgewählten Ländern rund 235.394 Mio US-\$. Die kunststoffverarbeitende Industrie in den USA weist 1989 einen Umsatz von 68.186 Mio US-\$ auf, was einer Veränderung zu 1988 von + 13,3 % entspricht. In Japan liegt der Umsatz an Kunststoffserzeugnissen bei 68.643 Mio US-\$ (Veränderung zu 1988: + 4,9 %) und in der Bundesrepublik bei 25.745 Mio US-\$ (Veränderung zu 1988: + 12,0 %). Die Aufteilung der Produktionsmengen und den Verbrauch in ausgewählten Ländern zeigt Bild 1.1 [41].

Die überwiegende Zahl der Kunststoffe wird aus Erdöl, einem der wichtigsten fossilen Rohstoffe, hergestellt. Die deutsche kunststoffverarbeitende Industrie hat einen Anteil von 4 % am Erdölverbrauch der Bundesrepublik Deutschland (Bild 1.2).

Von den im Jahr 1989 in der Bundesrepublik produzierten 9,063 Mio Mg Kunststoffen waren mengenmäßig vor allem Polymerisationsprodukte, die am Gesamtkunststoffverbrauch einen Anteil von 65 % hatten, von Bedeutung. Auf Polykondensate und Polyadditionsprodukte entfielen 33 %. Tabelle 1.2 zeigt diese Aufteilung.

Bild 1.3 zeigt die Nutzung der Kunststoffe. Diese er-

Bild 1.2 Aufteilung des Mineralölverbrauchs der Bundesrepublik nach Verbrauchssektoren [148]



folgte 1988 zu 25.% im Bausektor und zu 21.% für Verpackungen. Weitere wichtige Einsatzbereiche sind die Elektro-, Fahrzeug- und Möbelindustrie sowie die Landwirtschaft.

Tabelle 1.2 Erzeugung ausgewählter Kunststoffe in der Bundesrepublik in den Jahren 1981 bis 1989 in 1.000 Mg [41]

Erzeugte Kunststoffe	1981	1983	1985	1987	1988	1989
Polykondensate, -additionsprodukte	2.131	2.164	2.426	2.724	2.931	3.004
Polymerisations-, Mischprodukte	4.242	4.696	4.946	5.544	6.007	5.895
davon Polyethylen	1.199	1.362	1.238	1.355	1.471	1.393
Polyvinylchlorid	0.918	1.090	1.208	1.320	1.412	1.340
Kunststoffe auf Zellulosebasis	0.183	0.170	0.190	0.173	0.163	0.164
Kunststoffe insgesamt	6.556	7.030	7.563	8.441	9.100	9.063

Bild 1.3: Einsatzgebiete von Kunststoffen 1988 [72]

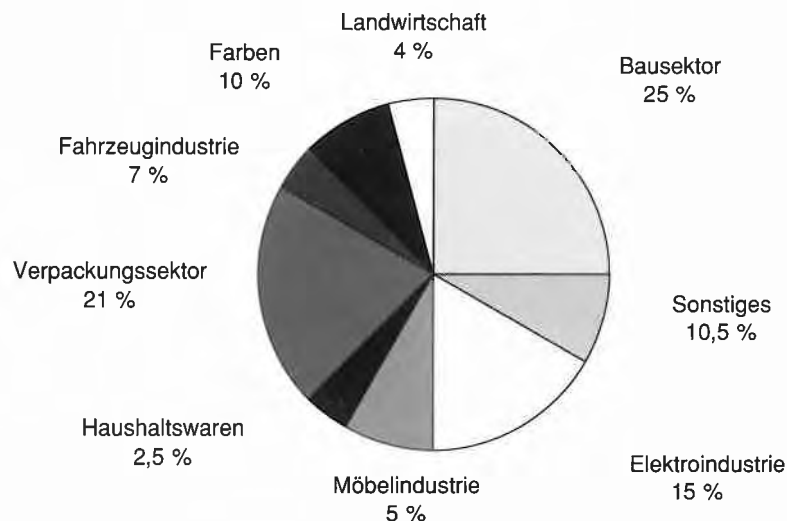


Tabelle 1.3 enthält eine Zusammenstellung der Einsatzgebiete verschiedener Thermoplaste im Haushaltsbereich.

Kunststoffprodukte aus PVC werden zu 55 % im Bausektor hauptsächlich für Rohre eingesetzt. Bild 1.4 zeigt Abnehmerindustrien und Anwendungen von PVC-Produkten 1989.

Tabelle 1.3: Anwendungsbeispiele von Massenkunststoffen im Haushaltsbereich

Anwendungsbeispiel	Kunststoffe
Geschirr, Besteck, Küchenmaschinenteile und Gehäuse	PE, PP, PVC, PA, PS, PC, EPS
Tischdecken, Verkleidungen	PVC (weich)
Badezimmerausstattungen	PVC
Verpackungsfolien	PE
Tragetaschen	PE, PVC
Kaschierfolien für Beutel	PP
Dichte Verbundfolien für Lebensmittel	PE (Aluminium), PETP, PVDC
Verpackungen	PETP
Schrumpffolien für Verpackungen	PE, PVC (weich)
Kochbeutel	PE
Einstellbeutel für Flüssigkeiten (Getränke, Öle, Spül-, Lösemittel)	PVC, PE
Verpackungsdosen, Becher, Obstkörbe, Besteckeinsätze	PVC, PS, PE, EPS
Hohlkörper (Großbehälter, Flaschen, Kanister)	PE, PP, PVC

Die bundesdeutsche Produktion betrug 1989 1,5 Mio Mg PVC und wies damit ein Minus von 5,2 % gegenüber dem Vorjahr auf. Nicht rückläufig hingegen ist der PVC-Verbrauch, der 1989 bei 1,25 Mio Mg lag, was einem Pro-Kopf-Verbrauch von 20 kg entspricht. Damit hat die Bundesrepublik einen Anteil von 25 % am europäischen Markt. Neben dem Bausektor, der überwiegend mit Hart-PVC-Teilen beliefert wird, ist der Verpackungssektor der zweitgrößte Abnehmer. Rund 75 % aller Rohre werden aus PVC gefertigt. Der Sanierungsbedarf wird für das öffentliche Netz auf 10 bis 20 %, für das private Netz sogar auf 40 bis 60 % geschätzt. Insgesamt wären das ca. 870.000 Rohrkilometer. Von den 10 Mio Fenstern, die in der Bundesrepublik verbaut werden, sind nahezu 4,5 Mio aus PVC. In Bild 1.4 sind die Abnehmerindustrien und Anwendungsbereiche für PVC-Produkte dargestellt [72,26].

Im Bausektor werden Erzeugnisse aus Kunststoffen überwiegend als langlebige Produkte eingesetzt. Verpackungen dagegen sind im allgemeinen Produkte mit kurzer Nutzungsdauer. Während langlebige Produkte erst nach mehreren Jahren als Abfälle auftreten, beeinflussen kurzlebige Kunststoffserzeugnisse die Entwicklung der Abfallmenge unmittelbar.

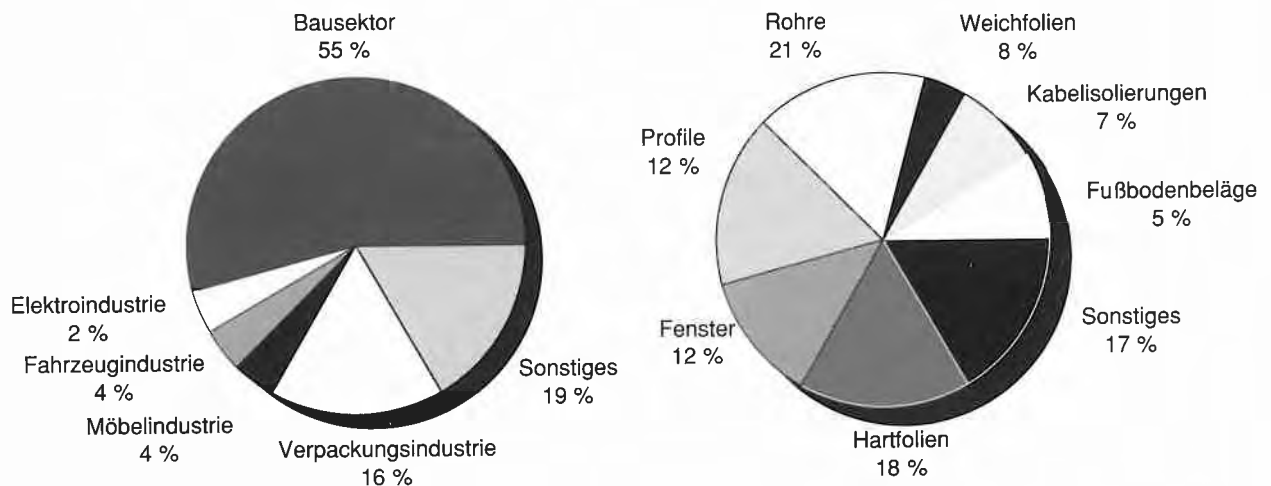
Die Produktion von Kunststoffverpackungen ist nach [41] bis zum Jahr 1984 auf 2,02 Mio Mg angewachsen. Davon entfielen 63 % auf Packmittel und 37 % auf Folienprodukte.

Der Anteil von Kunststoffverpackungen an der Gesamtproduktion von Kunststoffen erhöhte sich zwischen 1960 und 1973 von 16 % auf 33 % (Bild 1.5). Seit 1973 jedoch ist der Anteil innerhalb gewisser Schwankungsbreiten konstant.

Der Anteil von Polyethylen an der Packmittelproduktion belief sich 1984 auf 66 %. Es folgten Polystyrol mit 12 %, Polypropylen mit 10 % und PVC mit 9 % [22].

Seit den fünfziger Jahren erlangte eine weitere Kunststoffart, das Polyethylenterephthalat (PET oder PETP) neben der Herstellung von Spinnfasern bei der Herstellung von Folien große Bedeutung. Durch amorphe Modifikationen kann die Kristallinität von

Bild 1.4 Abnehmerindustrien und Anwendungen von PVC 1989 [72]



PETP so weit verringert werden, daß die daraus hergestellten Formteile auch bei großer Wanddicke transparent bleiben. Seit etwa 12 Jahren wird dieser Kunststoff insbesondere als Konkurrenzprodukt zur Getränkflasche eingesetzt. Der Gewichtsvorteil der PET-Flasche gegenüber der Glasflasche beträgt 1 : 20. Ausgehend von den USA, findet die PET-Flasche in Europa, unter anderem auch in der Bundesrepublik, in zunehmendem Maße Verbreitung (Tabelle 1.4). Gebremst wurde die Entwicklung durch die Verordnung über die Rücknahme und Pfanderhebung von Getränkeverpackungen aus Kunststoffen vom 28. 12. 1989. Dieses Pfand in Höhe von 0,50 DM (incl. MwSt.) wird auf allen Handelsstufen erhoben. Auf diese Verordnung reagierte die EG-Kommission mit einem Vertragsverletzungsverfahren gegen die Bundesrepublik mit der Begründung, diese Verordnung verletze den innergemeinschaftlichen Handel. Im einzelnen wird angeführt, daß der Pfandbetrag höher als bei Glas liegt, die Verordnung keine angemessene Übergangszeit vorsieht und Milchverpackungen von dieser Verordnung ausgenommen sind.

Tabelle 1.4: PET-Flaschenmaterial-Verbrauch (in 1.000 Mg) [72]

Jahr	USA	Europa (West)	Sonstige	Gesamt
1977	15	--	1	16
1978	70	--	2	72
1979	140	3	15	158
1980	160	8	25	193
1981	175	19	35	229
1982	210	32	50	292
1983	250	50	80	380
1984	290	70	100	460
1985	330	90	125	545
1986	360	110	150	660
1988	400	214	200	814
1989	420	257	225	902
1990	440	293	250	983

Inzwischen haben einige Getränkehersteller den Schritt von der Einweg-Flasche zur Mehrweg-PET-Flasche gemacht, die primär wiederbefüllt und sekun-

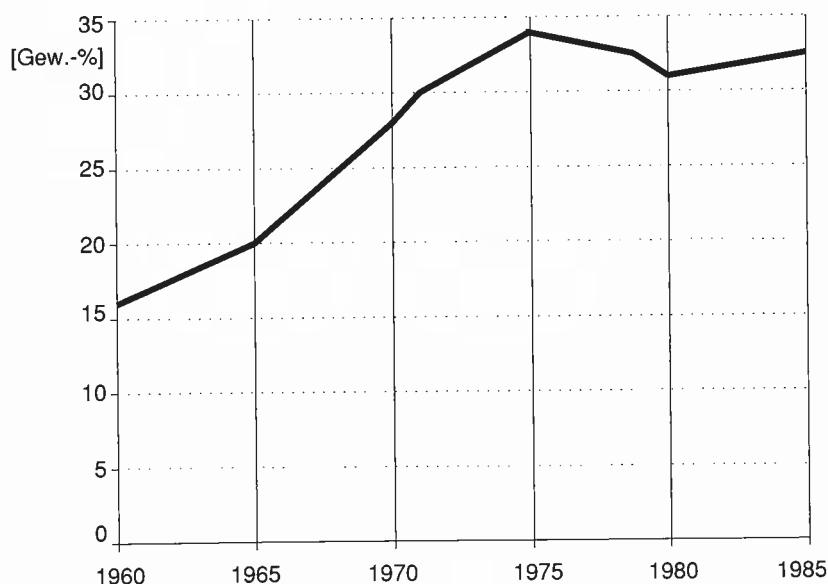


Bild 1.5: Entwicklung des Anteils der Kunststoffverpackungen bezogen auf die Gesamtproduktion von Kunststoffprodukten [41]

där einem Stoffrecycling zu geführt werden soll. Die Kritik an der PET-Mehrwegflasche gründet sich vor allem auf das bislang ungelöste Problem der Migration von Fremdstoffen. Einen direkten Umsatzaufschwung erwarten die PET-Folienhersteller durch die gegenwärtige „PVC-Diskussion“, die sich bereits in einer Reihe von Umstellungen von Hart-PVC auf PET niederschlug. Der Umsatz an PVC-Flaschenmaterial sank von 1988 zu 1989 um 16 % [72].

1.4 Definition und Charakterisierung der Kunststoffabfälle

Kunststoffabfälle fallen im gewerblich/industriellen und im privaten Bereich an. Nachfolgend werden drei Ebenen der Abfallentstehung unterschieden.

– **Rohstoffherzeugung:** Hierzu zählen alle Produzenten von Kunststoffrohstoffen in der chemischen Industrie (Großbetriebe). Aus Primärstoffen werden verkaufsfähige Produkte erzeugt. Ein Teil der anfallenden Reststoffe kann einem innerbetrieblichen Recycling zugeführt werden, d. h. in den ursprünglichen Prozeß direkt wieder eingegliedert werden. Ein anderer Reststoffstrom wird an Aufbereitungsbetriebe abgegeben oder muß als industrieller Abfall entsorgt werden. Zu den Reststoffen aus der Rohstoffherzeugung zählen im weitesten Sinne auch die Reststoffe aus der Primärstoffproduktion. Dabei nehmen die Reststoffe aus der Chlorgewinnung, der Vinylproduktion, aus der Produktion der Hilfsstoffe (insbesondere Stabilisatoren) und Additive (insbesondere Weichmacher) mengenmäßig großen Raum ein. Die Vielzahl unterschiedlicher z. T. toxischer Chemikalien stellt höchste Anforderungen an die Entsorgungstechnologien. Die Reststoffe der Rohstoffherzeugung weisen eine hohe Reinheit bzw. Homogenität auf. Über die Rezepturen der Rohstoffe kann die Zusammensetzung dieser Reststoffe genau definiert werden.

– **Kunststoffverarbeitung und -aufbereitung:** In einer Vielzahl kleiner und mittlerer Betriebe verschiedener kunststoffverarbeitender Wirtschaftszweige, wie z. B. Fahrzeug-, Elektro-, Möbelindustrie, Verpackungsmaterial- und Baustoffproduzenten, Spielwarenindustrie werden von den Rohstoffherzeugern bereitgestellte oder importierte Rohmaterialien zu Halbzeugen oder Fertigprodukten verarbeitet.

In Aufbereitungsbetrieben werden sortenreine Kunststoffabfälle anderer kunststoffverarbeitender und rohstoffherzeugender Betriebe aufbereitet. Die Aufbereitungsbetriebe erhalten ihr Ausgangsmaterial sowohl aus dem industriell/gewerblichen als auch aus dem privaten Bereich.

Der überwiegende Teil der in dieser Ebene anfallenden Reststoffe wird innerbetrieblich recycelt oder durch die Aufbereitungsbetriebe verwertet. Da der einzelne Betrieb die unterschiedlichen Einsatzstoffe weitgehend getrennt voneinander verarbeitet, lassen sich die jeweiligen Reststoffe separat erfassen. Diese Reststoffe weisen teilweise eine ähnlich hohe Reinheit auf wie die Reststoffe der Erzeugerebene. Da die Einsatzstoffe bei den Verarbeitern bekannt sind, kann die Zusammensetzung der Reststoffe jeweils genau definiert werden. Darüberhinaus ent-

stehen Abfälle, die zu beseitigen sind. Entsprechend den Abfällen aus der Rohstoffherzeugung stellen diese höchste Anforderungen an die Entsorgungstechnologien.

– **Weiterverarbeitende Betriebe, gewerbliche Endverbraucher und private Haushalte:** Unter weiterverarbeitende Betriebe fallen z. B. Installateure, Hersteller von Rolläden und Fenstern, Fußbodenverleger oder Polstereien. Zu den gewerblichen Endverbrauchern zählen Branchen wie der Groß- und Einzelhandel (Verpackungen), die Landwirtschaft (Folien), Großküchen und Fluggesellschaften (Kunststoffgeschirr), aber auch Behörden und Dienstleistungsunternehmen.

Die in diesem Bereich anfallenden Reststoffe werden überwiegend als hausmüllähnlicher Gewerbeabfall beseitigt und nur in wenigen Fällen den kunststoffaufbereitenden Betrieben zugeführt. Zumeist fallen Reste verschiedener Erzeugnisse gleichzeitig an und werden nicht getrennt. Bei Verbundstoffen ist die Stofftrennung zudem erschwert oder unmöglich. Die Zusammensetzung der Reststoffe ist im allgemeinen nicht bekannt.

Im privaten Bereich fallen Kunststoffabfälle verschiedener Kunststoffarten und -qualitäten gleichzeitig an, diese lassen sich kaum trennen. PVC-haltige Abfälle verursachen große Entsorgungsprobleme. Ein Großteil dieser Kunststoffe dient als Verpackung und ist meist mit dem Packungsinhalt verunreinigt. Verstärkt anfallende Materialverbundstoffe (z. B. Aluminium/Kunststoff-kaschierte Kartonverpackung, Wegwerfwinkel, Behälter aus mehreren Kunststoffarten) erschweren eine getrennte Sammlung. Dadurch ist die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle aus dem privaten Bereich nicht definierbar. Durch starke Verunreinigung wird die stoffliche Verwertung zusätzlich erschwert.

1.5 Kunststoffabfälle aus Haushalten und Gewerbe

Abfälle aus Haushalten sind diejenigen Abfälle, die aus Privathaushalten stammen und über eine turnusmäßige, z. B. wöchentliche Abfuhr entsorgt werden.

Nicht einheitlich definiert dagegen ist bisher der Begriff des Gewerbeabfalls. Dabei erscheint es besonders bei den Kunststoffabfällen sinnvoll, eine Trennung nach Abfällen aus der Kunststoffproduktion und der Kunststoffverarbeitung einerseits und von Kunststoffen, die nach einer Verwendung zu Abfällen werden, andererseits vorzunehmen. Bei letzteren handelt es sich vorwiegend um Abfälle aus der Landwirtschaft (Agrarfolien, Düngemittelverpackungen u. ä.), dem Handel (Verpackungen) und aus dem Bereich der Installation (Verpackungen).

Im Rahmen der Bundesweiten Hausmüllanalyse [5, 6] ergab sich für 1985 eine Abfallmenge an Kunststoffen aus Privathaushalten von 755.000 Mg/a (Tabelle 1.5).

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, daß sich die Abfallmenge an Kunststoffen zwischen 1979/80 und 1985 um jährlich 4 % verringert hat. Dies beruht in erster Linie auf der Abnahme des Kunststoffanteils im Haushaltsabfall und nur zum geringen Teil auf einer

Tabelle 1.5 Abfallmenge und Kunststoffanteil in Haushaltsabfällen in der Bundesrepublik Deutschland für 1979 – 1985 [6]

Parameter	Einheit	Haushaltsabfall				
		1979/80	1983	1984	1985	Änderung 1979–1985
Hausmüll	1.000 Mg/a	14.944	15.178	14.836	14.023	– 6 %
Kunststoffmengen	1.000 Mg/a	916	878	883	755	– 18 %
Kunststoffanteil	Gew.-%	6,1	5,8	6,0	5,4	– 11 %

Abnahme des Gesamtaufkommens an Haushaltsabfällen. Im Gegensatz dazu steht die ständig steigende Kunststoffproduktion in der Bundesrepublik. Erklärbar wird dies durch einen steigenden Kunststoffanteil im hausmüllähnlichen Gewerbemüll.

Zu deutlich abweichenden Ergebnissen kommt Barghorn in seiner Berliner Hausmüllanalyse 1989/90 [7]. Ermittelt wurde eine Gesamt-Hausmüllmenge im Jahresdurchschnitt 1989/90 von 0,2849 Mg/E • a und die darin enthaltenen Kunststoffabfälle von 0,0215 Mg/E • a. Untersuchungen über die prozentuale Hausmüllzusammensetzung im Jahresdurchschnitt weisen einen Kunststoffanteil von 7,2 % ohne Recycling-Maßnahmen (Papier/Pappe, Glas, Gartenabfälle), von 9 % mit Recycling-Maßnahmen sowie von 7,6 % in der Gesamtbetrachtung aus [7].

In Untersuchungen von 1988 über Erfassungsquoten bei verschiedenen Sammelsystemen für Altkunststoffe in Bayern werden die Gesamtpotentiale für die verschiedenen Strukturbereiche wie folgt angegeben [50] (siehe Kapitel 3.3.1):

- städtisch 19,8 kg/E • a
- ländlich 14,4 kg/E • a
- gesamt 15,9 kg/E • a

Ca. 90 % der im Haushaltsabfall enthaltenen Kunststoffe bestehen aus den vier Massenkunststoffen PE, PP, PS und PVC (Tabelle 1.6). Der größte Anteil entfällt dabei auf die Fraktion PE/PP mit rund 52 %. Unter den sonstigen Kunststoffen tragen Schaumstoffe aus EPS und PUR (Polyurethan) durch das geringe spezifische Gewicht von ca. 20 kg/m³ zum Abfallaufkommen bei.

In Abfällen sind vorwiegend Produkte aus thermopla-

Tabelle 1.6 Verteilung der Kunststoffarten im Haushaltsabfall bei getrennter Sammlung wiedergewinnbare Anteile

Kunststoffart	Anteil nach [154] 1984	Anteil nach [78] o. J.	Anteil nach [72] 1986
PE/PP	67 %	65 %	52 %
PS	16 %	15 %	23 %
PVC	12 %	10 %	14 %
Sonstige (EPS, PUR-Schaum)	5 %	10 %	11 %
Gesamt	100 %	100 %	100 %

stischen Massenkunststoffen zu finden. Spezialkunststoffe thermoplastischer, duroplastischer und elastomerer Art werden für hochwertige, d. h. langlebige Gebrauchsgüter verwandt (Bausektor, KFZ-Branche, Elektroindustrie) und sind daher noch weitgehend im Wirtschaftskreislauf enthalten.

Entsprechend dem jeweiligen Verwendungszweck lassen sich Kunststoffprodukte in kurzlebige (Nutzungsdauer < 1 Jahr) und langlebige (Nutzungsdauer > 1 Jahr) Erzeugnisse einteilen [35]:

- Gebrauchsdauer der Produkte bis 1 Jahr 20 %,
- Gebrauchsdauer der Produkte 1 bis 8 Jahre 15 %,
- Gebrauchsdauer der Produkte 8 bis 50 Jahre 65 %.

Danach befinden sich 80 % der Kunststoffherzeugnisse länger als ein Jahr in Gebrauch, nur etwa 20 % fallen bereits im Jahr nach der Herstellung als Abfall an.

Die Höhe des Kunststoffverbrauchs und die mittlere Gebrauchsdauer der Produkte sind entscheidend für die gegenwärtige und künftige Entwicklung des Aufkommens an Kunststoffabfällen (Tabelle 1.7, Bild 1.6).

Das Abfallaufkommen aus Kunststoffherzeugnissen stieg von weniger als 0,1 Mio Mg im Jahr 1960 auf über 1,7 Mio Mg im Jahr 1984 (Tabelle 1.7, Bild 1.6). Für 1987 wurde aufgrund des Gesamtaufkommens an Haushalts- und haushaltsähnlichen Gewerbeabfällen ein Kunststoffanteil von 2,2 Mio Mg errechnet. Für 1989 liegen noch keine Berechnungen vor, es werden 2,5 Mio Mg angenommen. Diese Kunststoffabfallmenge läßt sich mit der Prognose von ARGUS, die für die Jahrtausendwende einen Wert von 3,0 Mio Mg annimmt, in Einklang bringen.

Nach einer britischen Studie betrug das Abfallaufkommen aus Kunststoffherzeugnissen in Westeuropa im Jahre 1989 13 Mio Mg, für 1995 werden 16,5 Mio Mg, für das Jahr 2000 etwa 21 Mio Mg prognostiziert. Tabelle 1.8 zeigt den Kunststoffverbrauch und das Abfallaufkommen in Westeuropa im Jahre 1989 nach Anwendungsgebieten [30].

Die Entwicklung der Abfallmenge verlief dabei gleichförmiger als die Entwicklung des Inlandsverbrauchs. Im Jahr 1975 beispielsweise ging der Verbrauch gegenüber dem Vorjahr um ca. 4 % zurück, während die Abfallmenge um weniger als 1 % abnahm. Zurückzuführen ist dies auf einen steigenden Anteil der langlebigen gegenüber den kurzlebigen Erzeugnissen im Abfall. Bis 1980 überwog der Anteil der kurzlebigen Produkte im Abfall; der Anteil ist seitdem auf 46 % zurückgegangen.

Tabelle 1.7 Inlandsverbrauch und Abfallaufkommen von Kunststoffprodukten zwischen 1960 und 1985 [in 1000 Mg]

Jahr	Verbrauch an Kunststoff- erzeugnissen	Abfallaufkommen		
		kurzlebige Produkte	langlebige Produkte	Gesamt
1960	470	94	0	94
1961	525	105	9	114
1962	634	127	18	145
1963	740	148	31	179
1964	888	178	44	222
1965	1.008	202	61	263
1966	1.068	214	80	294
1967	1.148	230	100	330
1968	1.424	285	121	406
1969	1.737	347	147	494
1970	1.970	394	178	572
1971	2.285	457	212	669
1972	2.583	517	252	769
1973	2.882	576	299	875
1974	2.762	552	349	901
1975	2.482	496	398	894
1976	2.948	590	440	1.030
1977	3.126	625	491	1.116
1978	3.325	665	544	1.209
1979	3.744	749	599	1.348
1980	3.767	753	663	1.416
1981	3.604	721	724	1.445
1982	3.515	703	783	1.486
1983	3.812	762	840	1.602
1984	4.050	810	903	1.713
1985	4.055	811	969	1.780

Zwischen 1960 und 1985 wurden in der Bundesrepublik ca. 61 Mio Mg Kunststoffherzeugnisse verbraucht. Als Abfall sind im gleichen Zeitraum dagegen lediglich 21 Mio Mg angefallen (Bild 1.7). Demnach sind gegenwärtig 40 Mio Mg an Kunststoffen in der Bundesrepublik im Umlauf. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um langlebige Gebrauchsgüter, wie z. B. Fenster, Möbel und technische Geräte.

deutlich stärker wachsen als der Verbrauch an Kunststoffen. Nach einer Prognose von ARGUS [22] wird der Kunststoffverbrauch bis zur Jahrtausendwende gegenüber 1985 um 25 % auf 5 Mio Mg/a anwachsen, während im gleichen Zeitraum die Abfallmenge um ca. 70 % auf 3 Mio Mg/a zunimmt. Die langlebigen Erzeugnisse werden dann einen Anteil im Abfall von 60 % aufweisen (Bild 1.8).

Aufgrund der hohen Nutzungsdauer dieser Warengruppen wird die Abfallmenge in den nächsten Jahren

Tabelle 1.9 zeigt eine Gegenüberstellung der Produktion von Kunststoffherzeugnissen sowie das Abfallauf-

Bild 1.6 Entwicklung des Inlandsverbrauchs und des Abfallaufkommens von Kunststoffherzeugnissen

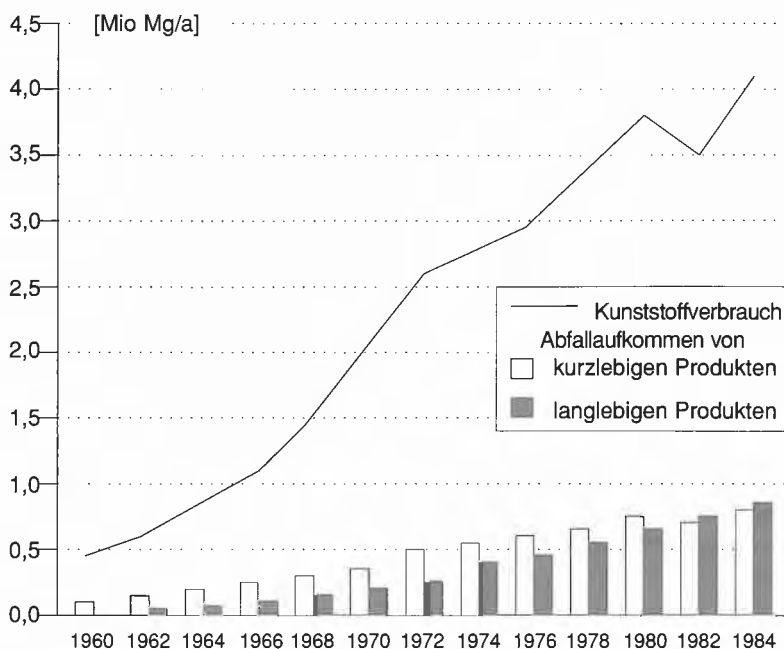


Tabelle 1.8 Kunststoff-Verbrauch und -Abfall nach Anwendungsgebieten Westeuropa 1989 [30]

Anwendungsgebiet	Verbrauch in %	Abfall in %
Verpackung	40	58
Bauwesen/Elektrotechnik	30	15
Haushaltswaren/Möbel	15	15
Transport/Automobilbau	7	5
Sport/Freizeit/Bekleidung	5	6
Landwirtschaft	3	3

kommen getrennt nach Haushaltsabfällen sowie Gewerbeabfällen und Sperrmüll in Abhängigkeit von der Produktlebensdauer. Auffällig ist die unterschiedliche Verteilung von kurzlebigen Gütern im Haushalts- und Gewerbeabfall. Im Haushaltsabfall betrug der Anteil der kurzlebigen Kunststoffe 84 %, im hausmüllähnlichen Gewerbeabfall dagegen nur 23 %. Hier überwiegen die langlebigen Produkte mit 77 %.

Die Abfallproblematik, die in Zukunft von den Kunststoffabfällen ausgeht, wird am Beispiel der langlebigen PVC-Produkte und der darin gebundenen Schwermetalle deutlich. Derzeit sind 1,5 Mio Mg PVC-Fensterprofile mit einer jährlichen Zuwachsrate

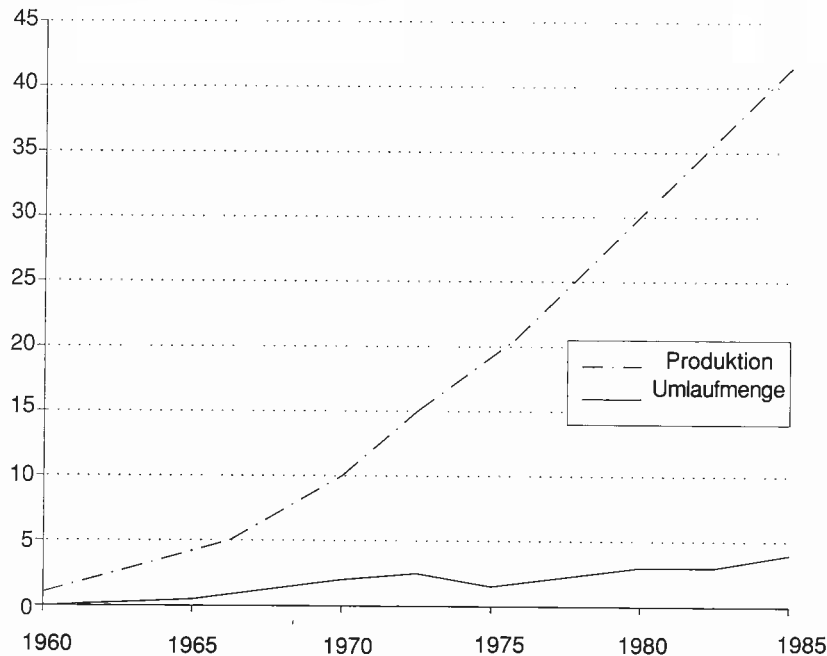


Bild 1.7 Im Umlauf befindliche Kunststoffmengen im Vergleich zur Produktion in der Bundesrepublik Deutschland

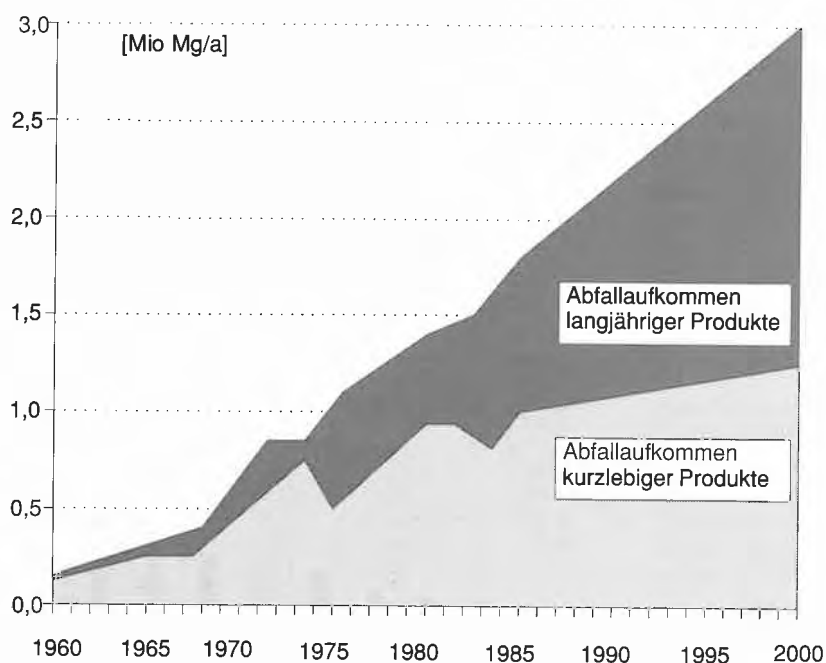


Bild 1.8 Aufteilung des Aufkommens an Kunststoffabfällen nach der Produktlebensdauer [in 1.000 Mio Mg/a]

Tabelle 1.9 Produktionsmenge von Kunststoffen und Abfallmengen nach Abfallarten für 1985 in 1.000 Mg [22]

Lebensdauer	Produktion		Hausmüll		Abfallaufkommen Gewerbe-/Sperrmüll		Gesamt	
< 1Jahr	860	20 %	602	33 %	258	14 %	860	47 %
> 1 Jahr	3.740	80 %	113	6 %	847	47 %	960	53 %
Gesamt	4.330	100 %	715	39 %	1.820	100 %	1.820	100 %

von 134.000 Mg im Gebrauch. Darin eingelagert und um rund 200 Mg/a steigend, befinden sich 3.000 Mg Cadmium. Es ist zu erwarten, daß diese Steigerungsrate abnehmen wird, da Cadmium zunehmend substituiert werden kann. Blei ist in mehreren 100.000 Mg in PVC-Produkten eingearbeitet. Infolge des zeitverzögerten Aufkommens werden Cd- und Pb-haltige PVC-Abfallstoffe überproportional zunehmen [69].

Im Gebiet der neuen Bundesländer bestand eine andere Situation: Im Bereich des Verpackungswesens führten Vorgaben zur absoluten Materialeinsparung, ungenügende technische Erneuerungen sowie Anwendungsverbote für Kunststoffe aber auch für Papier, Pappe und Karton zu einem ausgesprochen geringen Anfall an Verpackungsabfall. Die Abfälle wurden auf Deponien entsorgt oder über das jährlich in Millionenhöhe subventionierte Sekundärrohstoffersorgungssystem einer Wiederverwertung zugeführt. Thermoplastische Kunststoffe für Verpackungen konnten 1988 in einer Menge von 7.000 Mg erfaßt werden. Eine Analyse der Kommunalabfälle ergab: Polyolefine 57 %, PVC 21 %, PS- und Copolymere 15 %, sonstige 7 %, wobei 92 % der erfaßten Flaschen aus Polyolefinen bestanden. Der relativ hohe PVC-Anteil resultiert aus Lebensmittelverpackungen und ist stark rückläufig [136].

Mit Öffnung der Mauer hat sich der Verpackungsabfall sowohl in seiner Art als auch in seiner Zusammensetzung gravierend verändert. Nach einer Analyse des Hausmüllaufkommens der Stadt Potsdam im Sommer 1990 hat sich das Haushaltsabfallaufkommen nach der Wirtschafts- und Währungsunion verdoppelt.

Aufgegliedert nach den neuen Bundesländern gibt Tabelle 1.10 die zu erwartenden Packstoffmengen aus Kunststoff im Hausmüll in den nächsten Jahren an.

Die Hochrechnungen der Tabelle 1.10 basieren auf dem zu erwartenden, angeglichenen Niveau aus den westdeutschen Bundesländern. Unter Zugrundelegung der bekannten Entwicklung in den alten Bun-

Tabelle 1.10 Prognose Packstoffmengen und Kunststoff in den Haushaltsabfällen der neuen Bundesländer in 1000 Mg/a [152]

Bundesland	Pack-, Kunststoffmengen [1000 Mg/a]
Berlin-Ost	10
Mecklenburg-Vorpommern	15
Brandenburg	39
Sachsen-Anhalt	24
Sachsen	42
Thüringen	20
Summe	150

desländern und unter der Annahme eines funktionierenden dualen Entsorgungssystems wird ab 1995 von zu erfassenden Kunststoffen in der Größenordnung von 120.000 bis 130.000 Mg ausgegangen [152].

1.6 Umweltauswirkungen durch die Abfallentsorgung

Als Umweltauswirkungen sollen nicht nur direkt entstehende Umweltprobleme, d. h. Emissionen aller Art, verstanden werden, sondern auch indirekte Auswirkungen aufgrund von Behandlungsverfahren und Anlagenstandorten.

Die letzten vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Zahlen über die Art der Abfallbeseitigung nach einzelnen Anlagenarten stammen aus dem Jahr 1987 (Tabelle 1.11). Zu diesem Zeitpunkt wurden in der Bundesrepublik Deutschland 70,7 % aller Siedlungsabfälle deponiert, 25,5 % verbrannt, 2,0 % zu Kompost verarbeitet und 1,9 % auf sonstige Weise behandelt. Durch die Inbetriebnahme weiterer Müllverbrennungsanlagen nach 1982 wurden 1987 26 % der Siedlungsabfälle verbrannt, bis zum Jahre 2000 wird dieser Anteil mit 35 % prognostiziert. Der Anteil der Deponierung sank von 1982 bis 1987 von 76 % auf unter 67 % und wird für das Jahr 2000 mit unter 50 %

**Tabelle 1.11 Abfallbeseitigung von Siedlungsabfällen nach Anlagenarten
Stand und Prognosen [18]**

Entsorgungsmethode	Anteil am gesamten Siedlungsabfall in %					
	1977	1982	1984	1987	1990	2000
Deponie	74,70	76,10	72,96	67,77	63,80	49,35
MVA	22,40	22,30	24,57	26,20	28,80	35,10
Kompostierung	2,60	1,6	1,93	2,40	2,85	5,40
Pyrolyse	—	—	0,03	0,03	0,05	0,85
Sortierung, BRAM	—	—	0,51	3,60	4,50	8,30

Tabelle 1.12 Beseitigung der Kunststoffabfälle für 1987/88 (geschätzt) [88]

Beseitigungsart	Menge [1.000 Mg/a]	Anteil [Gew.-%]
Deponierung	1.300	52
Verbrennung	665	26,6
Kompostierung	20	0,8
Recycling sortenreiner Produktionsabfälle	500	20
Recycling vermischter Haushaltsabfälle	15	0,6
Gesamt	2.500	100

erwartet. Demgegenüber nahm der Anteil der Sortierung und des Brennstoffs aus Müll (BRAM) von 1984 bis 1987 um den Faktor 7 zu, bis zum Jahre 2000 wird ein Anteil von über 8 % erwartet [18]. Siehe dazu Tabelle 1.11.

Im Jahre 1984 fielen etwa 29,6 Mio Mg, im Jahre 1987 etwa 31 Mio Mg Haushaltsabfälle, haushaltsabfallähnliche Gewerbeabfälle, Straßenkehricht und Marktabfälle an. Die Haushaltsabfälle haben daran mit ca. 15 Mio Mg/a einen Anteil von rund 48 Gew.% [18]. Wird der Kunststoffgehalt mit 7 % angenommen, so ist davon auszugehen, daß die insgesamt zu entsorgende Kunststoffmenge ca. 2,2 Mio Mg/a beträgt, andere Quellen gehen sogar von 2,5 Mio Mg/a aus. Bezogen auf die einzelnen Behandlungsverfahren ergibt sich die folgende Situation (Tabelle 1.12).

Die Anteile der einzelnen Anlagenarten an der Entsorgung von Kunststoffabfällen sind jedoch nur eingeschränkt miteinander vergleichbar, da diese aus verschiedenen Quellen stammen und nach unterschiedlichen Methoden erhoben wurden. Unterschiedliche Kunststoffanteile in den einzelnen Anlagenarten sind ebensowenig berücksichtigt wie die Auswirkungen der getrennten Sammlung von Kunststoffen auf die Müllzusammensetzung einzelner Regionen.

1.6.1 Deponie

Jährlich werden ca. 1,3 Mio Mg an Kunststoffen auf Deponien abgelagert (vgl. Tabelle 1.12). Die bislang überwiegend eingesetzten Kunststoffe sind biologisch nicht abbaubar (vgl. Kapitel 6.4). Kunststoffe verursachen bei normalem Deponiebetrieb praktisch keine flüssigen oder gasförmigen Emissionen. Lediglich bei Schwelbränden ist mit unkontrollierten Emissionen zu rechnen. Das Langzeitverhalten von Kunststoffen in Deponien und bei Kontakt mit anderen Deponieinhaltsstoffen kann jedoch erst ansatzweise beurteilt werden. Untersuchungen an PVC-Artikeln zeigten, daß bei Kontakt mit Deponiesickerwasser Additive ausgewaschen werden. Sowohl im sauren als auch im neutralen oder basischen Medium (entsprechend den nacheinander ablaufenden Phasen während einer Rotte) kommt es zur Herauslösung von z. B. Barium-, Cadmium-Stabilisatoren (saures Medium), Farbpigmenten und zum Teil zu vollständigen Weichmacherverlusten, mit nachfolgender Herauslösung weiterer Additive. Auch Mikroorganismen (z. B. Pseu-

domonas Aeriginosa) sind in der Lage, erhebliche Mengen an Weichmachern aus PVC herauszulösen. Etwa 110.000 Mg PVC-Abfälle werden pro Jahr deponiert und stellen trotz der Schadstoffe ein vergleichsweise minimales Umweltrisiko dar. Aufgrund der Langlebigkeit der PVC-Produkte ist jedoch mit einem überproportionalen Anstieg dieser Abfälle zu rechnen, wodurch sich das Schadstoffpotential von Deponien zukünftig erhöhen wird [69].

In einem dichtbesiedelten Gebiet wie der Bundesrepublik sind Deponiestandorte knapp. Immer geringer werden die für Deponien in Frage kommenden Flächen, ständig wachsen Widerstände bei neu zu planenden Anlagen. Die geringe Dichte der Kunststoffe – häufig ein Produktvorteil – erweist sich bei der Deponierung als Nachteil. Kunststoffe beanspruchen bezogen auf den Massenanteil ein großes Volumen, das auch mit zunehmender Ablagerungsdauer nicht geringer wird.

Die Ablagerungsgebühren auf Deponien, die nach dem Stand der Technik eingerichtet sind und betrieben werden, übersteigen deutlich die Kosten älterer Deponien, so daß der Kostenvorteil gegenüber anderen Behandlungsverfahren geringer geworden ist.

1.6.2 Müllverbrennung

Die Kunststofffraktion trägt mit einem spezifischem Heizwert von 30.300 kJ/kg [17] zu 15–20 % zum Energiegehalt des Abfalls bei. Eine getrennte Entsorgung von Kunststoffen würde jedoch nicht zwangsläufig zu einer Abnahme des Heizwertes führen. Bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung von Papier, Glas, Metallen und Biomüll berechnete das Umweltbundesamt (UBA) sogar eine Steigerung des Heizwertes um ca. 5 % [8]. Bei einer entsprechenden Untersuchung von INTECUS in Hamburg-Harburg im Auftrag der Stadt Hamburg ergab sich bei weitgehend getrennter Wertstoffsammlung für den Restmüll im Jahresverlauf ein Heizwert von 4.800 bis 7.500 kJ/kg [56]. In Bild 1.9 ist der Einfluß der Entnahme einzelner Wertstofffraktionen auf die Entwicklung des Heizwertes dargestellt.

Ältere Verbrennungsanlagen wurden nicht für die heute üblichen Heizwerte des Hausmülls um 8.500 kJ/kg ausgelegt. Diese Anlagen können nur mit verminderter Durchsatzleistung betrieben werden. Die mit der Entfernung der Kunststoffe – ohne gleichzeitige materielle Verwertung anderer Stoffgruppen – verbundene Absenkung des Heizwertes würde an diesen Anlagen zu einer Erhöhung der durchsetzbaren Abfallmenge führen und daher aus der Betreibersicht wünschenswert sein.

Bei der Verbrennung von gemischten Kunststoffen werden neben Energie auch Schadstoffe in Form von HCl und diversen Schwermetallen freigesetzt und aus organischen Stoffen, wie z. B. Dioxine und Furane, gebildet. Aufgrund der etwa 48.000 Mg/a PVC, die jährlich verbrannt werden und eine Chlorfracht von ca. 27.000 Mg/a verursachen, und im Vergleich zum Massenstrom an HCl im Rohgas aller Verbrennungsanlagen kann der Beitrag der Kunststoffe zu der HCl-Emission auf 75–90 % geschätzt werden (Tabelle 1.13).

Bild 1.9 Einfluß der Entnahme einzelner Wertstofffraktionen auf die Entwicklung des Heizwertes von Haushaltsabfall [54]

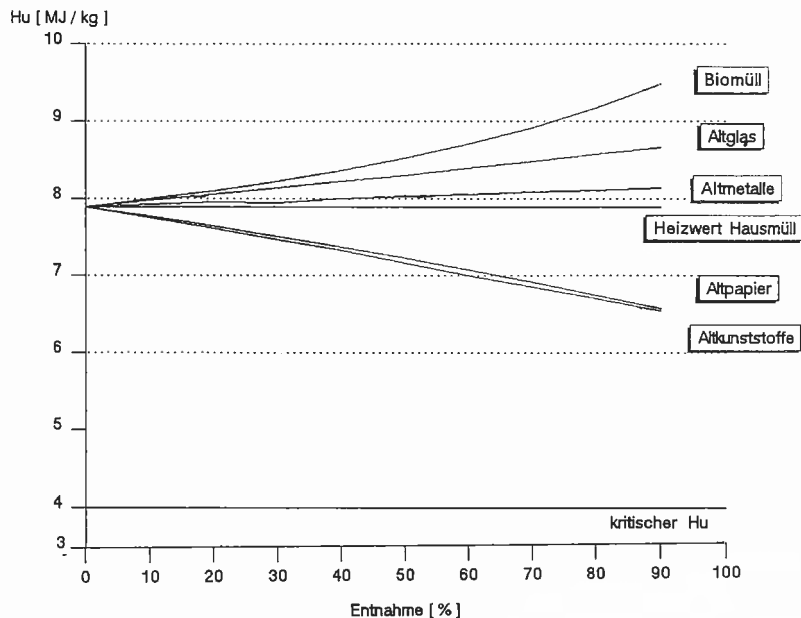


Tabelle 1.13 Daten zur Berechnung des Beitrags der Kunststoffe an der HCl-Rohgasfracht

Parameter	Gew.-%	1.000 Mg/a
Verbrannte Abfälle		8.000
Kunststoffanteil im Abfall	6	480
PVC-Anteil im Kunststoff	10	48
Chlor-Anteil im PVC	56	27
Jahresfracht HCl im Rohgas		30 – 35
HCl-Anteil aus PVC und HCl	77 – 90	

Bei der Verbrennung und anschließenden Neutralisation entstehen aus dem Chlor-Gehalt einer Tonne PVC 880 kg CaCl_2 bzw. 940 kg NaCl , die wiederum reine Entsorgungskosten von rund 500,- DM/Mg verursachen.

Über Kunststoffabfälle werden Schwermetalle in Haushaltsabfälle eingebracht, PVC verursacht einen Eintrag von 47 Mg/a Blei und 11 Mg/a Cadmium [142]. Die Anlagen mit Rauchgasreinigungsanlagen garantieren die Einhaltung bzw. Unterschreitung der Schwermetallgrenzwerte. Bei Deponierung der Filterstäube kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, daß Schwermetalle langfristig ausgelaugt werden.

Der Frage der Entstehung von Dioxinen und Furanen bei der Verbrennung von Hausabfällen mit Kunststoff-

insbesondere PVC-Anteilen wird intensiv nachgegangen. Die Erkenntnisse sind nicht abgeschlossen. Für die Bildung von Chloraromaten aus PVC als Vorläufer für die Bildung von PCDD/PCDF liegen experimentelle Belege vor. In den Verbrennungsrückständen von PVC-ummantelten Altkabeln wurden Chlorbenzole bis in den ppm-Bereich und von PCDD/PCDF bis in den oberen ppb-Bereich gefunden. Unstrittig ist, daß sich Dioxine und Furane oberhalb 250 °C aus Kohlenstoff in Gegenwart einer Chlorquelle, Sauerstoff und Kupfer- und/oder anderen Metallchloriden unter dem katalytischen Einfluß der Flugasche bilden. Bei der Verbrennung von Kunststoffen, die Flammenschutzmittel-Additive enthielten, wurden bromierte Dioxine gefunden, die wiederum mit HCl, NaCl oder PVC zu gemischt halogenierten Dioxinen und Furanen reagieren können. Die Vielzahl der Untersuchungen weisen auf einen ursächlichen Zusammenhang zwischen PVC-Verbrennung und PCDD/PCDF-Bildung [69].

Eine vollständige Entfernung der Kunststoffe bedeutet aus heutiger Sicht, da fast alle Anlagen mit Rauchgasreinigungssystemen ausgestattet sind, daß die Reinigungssysteme zwar nicht überflüssig sind, aber präziser auf die Abscheidung anderer schädlicher Rauchgaskomponenten ausgelegt werden können. Das Gefährdungspotential der als Sonderabfall zu entsorgenden Reststoffmengen (Schlacken, Filtersche) aus der Verbrennung ließe sich dadurch in ganz erheblichem Maße reduzieren.

2. Rechtliche und organisatorische Grundlagen

2.1 Rechtliche Grundlagen für die Sammlung und Verwertung von Kunststoffen aus Haushaltsabfällen

2.1.1 Verpackungsverordnung

Auf der Grundlage des Abfallgesetzes § 14 Absatz 2 (mengenrelevante Abfälle) kann die Bundesregierung Ziele für Vermeidung, Verminderung oder Verwertung festlegen. Werden diese Ziele nicht erreicht, ist sie durch das Gesetz ermächtigt, Rechtsverordnungen zu erlassen. In diesem Zusammenhang ist die „**Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen (VerpackVO)**“ vom 17. 5. 1990 zu erwähnen, die vom Bundeskabinett verabschiedet wurde. Der Bundesrat stimmte am 19. 4. 1991 zu. Somit tritt diese Verordnung in wesentlichen Teilen am 1. 12. 1991 in Kraft.

Erwartungen der Bundesregierung von der Wirtschaft [89]

- bis 31. 7. 1990 Vorschläge vom Einzelhandel und den Verpackungsherstellern für den Aufbau von Rücknahmesystemen außerhalb der öffentlichen Abfallentsorgung;
- bis Ende 1990 Kennzeichnung der jeweiligen Kunststoffart;
- bis 31. 12. 1990 Verzicht auf umwelt- und gesundheitsgefährdende Additive und Druckfarben, insbesondere toxische Schwermetallverbindungen mit Quecksilber, Cadmium und Blei;
- bis 31. 12. 1990 konstruktive Maßnahmen, z. B. durch Verzicht auf Verpackungsteile, die eine Verwertung verhindern;
- bis 1. 3. 1991 Beschränkung der für die einzelnen Verpackungen eingesetzten Kunststoffe auf möglichst eine Kunststoffart;
- bis 30. 6. 1991 Maßnahmen zur volumenarmen Erfassung, zum Beispiel durch Stapelfähigkeit;
- bis 30. 9. 1991 Vermeidung von Kunststoffarten, die die thermische Verwertung behindern.

Darüberhinaus regt die Bundesregierung die Entwicklung und den Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe an, die kompostiert werden können.

Zentrale Themen der Verpackungsverordnung sind das Zwangspfand und die Verpackungsrücknahmepflicht im Laden; wobei Rücknahmepflicht bei Teilnahme an einem separaten Rücknahmesystem („Duales System“) entfällt. Damit läßt die Verpackungsverordnung den Beteiligten zwei Alternativen offen:

- 1) Hersteller und Verteiler sind verpflichtet, Transportverpackungen zurückzunehmen und einer erneuten Verwendung oder Verwertung außerhalb der öffentlichen Abfallentsorgung zuzuführen. Umverpackungen können vom Endverbraucher ab dem 1. 4. 1992 an der Verkaufsstelle zurückgegeben werden. Verkaufsverpackungen sind vom

Verteiler in oder in unmittelbarer Nähe der Verkaufsstelle zurückzunehmen. Eine Pfandpflicht gilt für Verpackungen von flüssigen Nahrungsmitteln sowie für Verpackungen von Wasch- und Reinigungsmitteln und Dispersionsfarben.

- 2) Diese Verpflichtungen können entfallen, wenn von der beteiligten Wirtschaft ein haushaltsnahes Rücknahme-, Sortier- und Verwertungssystem geschaffen wird, über das die Verpackungen getrennt von der öffentlichen Entsorgung und auf Kosten der Wirtschaft entsorgt werden (siehe Kapitel 2.2.1).

Zielsetzungen der Verpackungsverordnung

- Verpackungen sind nach Volumen und Gewicht auf das zum Schutz des Füllgutes und auf das zur Vermarktung **unmittelbar notwendige Maß zu beschränken**;
- Soweit technisch und wirtschaftlich zumutbar sowie vereinbar mit den auf das Füllgut bezogenen Vorschriften sollen Verpackungen so gestaltet werden, daß sie **wiederbefüllt** werden können;
- Soweit die Voraussetzungen für eine Wiederbefüllung nicht vorliegen, sind Materialien einzusetzen, die vorrangig **umweltverträglich stofflich** oder **thermisch verwertet** werden können.

Mit den vorgegebenen Zielsetzungen soll dem Handel, den Abfüllern, den Verpackungsherstellern und der kunststofferzeugenden Industrie Gelegenheit gegeben werden, freiwillige Lösungen zu finden. Nach Ablauf der Frist wird die Bundesregierung prüfen, welche Maßnahmen durch Rechtsverordnung nach § 14 Absatz 2 Satz 3 Nr. 1 bis 5 Abfallgesetz zu treffen sind. Als solche Maßnahmen kommen u. a. Pfand- und Rücknahmepflicht in Betracht, wie sie am 1. 12. 1989 von der Bundesregierung mit der Verordnung über die Rücknahme und Pfanderhebung von Getränkeverpackungen aus Kunststoffen in Kraft traten. Der vorliegende Entwurf zum Abfallgesetz soll bewußt Handlungs- und Gestaltungsspielraum für die betroffenen Industrien, den Handel und die Entsorgungsunternehmen beim Aufbau eines dualen Entsorgungssystems lassen.

Fristen der Verpackungsverordnung

ab 1. 12. 1991 Rücknahmepflicht für Transportverpackungen

ab 1. 4. 1992 Rücknahmepflicht für Umverpackungen

ab 1. 1. 1993 Rücknahme- und Pfandpflicht für Verkaufsverpackungen

Um bei Getränkeverpackungen nicht das etablierte Mehrwegsystem zu gefährden, ist eine Freistellung durch das Duale System ist möglich, wenn der Mehrweganteil bei Erfrischungsgetränken nicht unter 72 %

und bei pasteurisierter Milch nicht unter 17 % absinkt. Die Einführung eines Pflichtpfandes in Höhe von 0,50 DM für Getränkeflaschen über 0,2 Liter Inhalt sowie Farbeimer ab 2 kg wird vorgeschrieben.

Von den nahezu 2 Mio Mg/a gemischten Kunststoffabfällen aus Haus- und Gewerbemüll fallen auf Kunststoffverpackungen 700.000 Mg. Sie machen etwa 50 Vol.-% des Hausmülls aus. Nur etwa 20.000 Mg werden einer stofflichen Verwertung zugeführt. Mit der neuen Verordnung sollen 600.000 Mg oder 86 % der Kunststoffverpackungen erfaßt und das Ziel erreicht werden, die öffentliche Entsorgung merklich zu entlasten. Massenartikel sollen über den Handel zurückgenommen und einer Verwertung außerhalb der öffentlichen Abfallentsorgung zugeführt werden.

Die Verordnung gilt nicht für Verpackungen mit Resten oder Anhaftungen schadstoffhaltiger Füllgüter; hierfür wird eine gesonderte Verordnung erwartet.

Kritiker der Verpackungsverordnung bemängeln, daß hiermit am Ende der Kette angegriffen wird – bei den Konsumenten – und nicht bei den Produzenten. Sie befürchten, daß damit nicht eine Verminderung der Verpackungsabfälle zu erreichen ist, sondern nur eine Umverteilung von der Hausmüllentsorgung zur Verbrennung außerhalb der öffentlichen Müllentsorgung. So wird zwar die öffentliche Abfallentsorgung entlastet, aber die Produktion von Verpackungen nicht eingeschränkt. Statistisch gelten diese Abfälle dann als vermieden. Die öffentliche Entsorgung soll von Verpackungsabfällen entlastet werden. Das bringt den Urhebern der VerpackungsVO den Vorwurf ein, die stoffliche Verwertung von Abfällen als Abfallvermeidung auszugeben und damit die vorgegebene Hierarchie in der Abfallbehandlung Vermeidung – Verwertung – Entsorgung zu mißachten [153].

Aus den EG-Gremien werden im wesentlichen drei Kritikpunkte laut: zum einen wird bemängelt, daß mit der Verpackungsverordnung nur Teillösungen der Gesamtproblematik angestrebt werden, zum anderen wird befürchtet, daß die Verordnung diskriminierende Wirkungen auslösen könnte. Als unzureichend wird angesehen, daß die Pfandverordnung nicht die in der EG-Richtlinie 85/339/EWG aufgeführte Milch erfasse.

Artikel 3 Absatz 1 der Richtlinie des Rates vom 15. 7. 1975 über Abfälle (75/422/EWG) verpflichtet die Mitgliedstaaten, geeignete Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen zu treffen.

Im Zusammenhang mit der Verordnung über die Rücknahme und Pfanderhebung von Getränkeverpackungen aus Kunststoffen führte der Bundesumweltminister am 16. 4. 1990 auf Wunsch der EG-Kommission eine Anhörung durch, die Aufschluß darüber geben sollte, ob es gegenüber dem deutschen System der Rückgabe leerer Verpackungen andere Rückgabesysteme mit gleicher Effizienz gibt. Vorge stellt wurde dabei ein Automaten system, das in der Praxis erst erprobt werden müßte.

Die EG-Kommission hat Anfang 1990 in Artikel 4 des Entwurfs der Richtlinie 85/339/EWG über Verpackungen für flüssige Lebensmittel zum Ausdruck gebracht,

daß sich „die Maßnahmen im Verpackungsbereich in den Rahmen einer Politik einfügen müssen, die alle in der Richtlinie aufgeführten Verpackungsmaterialien und flüssigen Lebensmittel umfaßt“ [86].

Die VerpackungsVO wird nicht zur Abfallvermeidung, sondern nur zu einer wenig effektiven Abfallverwertung führen. Rücknahme- und Pfandpflichten hätten ohne den Ausweg des Dualen Systems unmittelbare Zwänge zur Abfallvermeidung ausgeübt, weitgehende Umstellungen auf Mehrwegverpackungen hervorgerufen und eine Flut von Innovationen in Industrie und Handel ausgelöst [153].

In den Kritiken an der VerpackungsVO werden langfristige Auswirkungen, die diese Regelungen auf die Entwicklung der Verpackungsbranche haben werden, i. R. nicht berücksichtigt.

So ist damit zu rechnen, daß sich durch das der VerpackungsVO zugrundeliegende Verursacherprinzip das Mehrwegsystem über Preisvorteile stabilisieren wird. Voraussichtlich wird der Verbraucher verstärkt Mehrwegverpackungen vorziehen, da bei der Wahl von Einwegverpackungen deren Sammel- und Verwertungskosten direkt beim Kauf mitbezahlt werden, die die bepfandeten Verpackungen dagegen von der Verordnung ausgenommen sind.

Darüberhinaus werden die für die Sammlung und das Recycling Verantwortlichen aus Gründen des Wettbewerbs und der Wirtschaftlichkeit kurzfristig Verpackungsmengen reduzieren; auch der noch begrenzte Markt für Sekundärkunststoffe wird die Verpackungsbranche zu einer Reduktion der Verpackungsmengen veranlassen.

Mittelfristig werden Verpackungsmaterialien bevorzugt werden, die für eine stoffliche Verwertung geeignet sind. Dabei werden sich sortenreine und Einkomponenten-Kunststoffverpackungen durchsetzen können, da bei diesen Kunststoffen sowohl die Aufbereitungstechnik und -kapazität, als auch Absatzmärkte für die Sekundärprodukte vorhanden sind bzw. ausgebaut werden können.

Langfristig kann die VerpackungsVO mit dazu beitragen, daß ökologisch bedenkliche Bestandteile von Kunststoffen reduziert bzw. substituiert werden. Denn die VerpackungsVO sieht eine thermische Verwertung der Verpackungsabfälle vor, wenn eine stoffliche Verwertung nicht durchgeführt werden kann. Die thermische Verwertung von vermischten Kunststoffabfällen ist jedoch mit Emissionsproblemen verbunden, die technisch nur unzureichend zu lösen sind. Ökologisch unbedenklich kann eine thermische Verwertung nur werden, wenn das Input-Material frei ist von Bestandteilen (Substanzen in Additiven, halogenierte Kunststoffe), die diese problematischen Emissionen verursachen. Denkbar ist auch, daß es langfristig zu einer Reduzierung der Kunststoffarten und -qualitäten führen wird, die für Verpackungsmaterialien eingesetzt werden. Die Gründe werden in logistischen, technischen und organisatorischen Bedingungen der Sammlung und der stofflichen und auch der thermischen Verwertung liegen.

Das Ziel der Verordnung ist der Schutz des bestehen-

den Mehrwegsystems; die Bestimmungen der VerpackungsVO tragen dem jedoch nicht ausreichend Rechnung.

Laut Verordnung sind Sortierreste wieder der öffentlichen Entsorgung anzudienen; es fließen also wieder Abfallströme in die öffentlichen Entsorgungsanlagen.

Die VerpackungsVO enthält keine Verwertungsquote, es soll jedoch der Nachweis erbracht werden, daß eine „höchstmögliche stoffliche Verwertung“ gewährleistet wurde.

2.1.2 Technische Anleitungen, Vorschriften

Die zentrale Aussage des Abfallgesetzes lautet, daß die Abfallentsorgung so zu erfolgen hat, daß die Gesundheit der Menschen und ihr Wohlbefinden nicht beeinträchtigt werden.

Grund für den Erlass allgemeiner Verwaltungsvorschriften, wie etwa der Technischen Anleitung (TA) Abfall, war das Fehlen fester technischer Regelungen für die Abfallwirtschaft. Die Verwaltungsvorschrift regelt die Errichtung und den Betrieb von Entsorgungsanlagen sowie die Abfallentsorgung. Die Technische Anleitung kann die Entsorgung nach dem „Stand der Technik“ festlegen und anordnen.

Die Technische Anleitung zur Entsorgung besonders überwachungsbedürftiger Abfälle als Teil 1 der TA Abfall – die sog. TA Sonderabfall – setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Während der 1. Teil die Handhabung von Zulassungsverfahren bei Abfallentsorgungsanlagen, Anforderungen an die Zulassung von Abfällen zu Entsorgungswegen, Anforderungen an die Steuerung und Überwachung von Abfallströmen sowie Anforderungen an die Errichtung und Betriebsorganisation von Abfallentsorgungsanlagen regelt (in Kraft seit 1. 10. 1990), behandelt der 2. Teil die Anforderungen an die oberirdische und untertägige Ablagerung. In fünf Anhängen A bis E werden Einzelfragen, wie z. B. Kriterien für die Ablagerung, geregelt.

Die TA Sonderabfall beinhaltet den Grundsatz, daß die Entsorgung von Abfällen in allen Phasen umweltverträglich sein muß und auch langfristig keine Umweltschäden hervorrufen darf. Deshalb müssen Abfälle, deren Ablagerung unumgänglich ist, zuerst in eine ablagerungsfähige, d. h. umweltverträgliche Form gebracht werden. Andernfalls werden die Deponien von heute zu Altlasten der Zukunft.

In der TA Sonderabfall wurde für die Shredderrückstände die Entsorgungszuordnung im Abfallartenkatalog geändert. Neben der unverändert bevorzugten Zuordnung zu Sonderabfallverbrennungsanlagen wird in der Präferenzklasse 2 neben der Sonderabfalldeponie auch die Hausmülldeponie zugelassen.

Im Rahmen der Diskussion um die z. Zt. erarbeitete TA Siedlungsabfall (Teil 2 der TA Abfall) ist diese Zuordnung jedoch wieder umstritten. Zur Klärung, unter welchen Voraussetzungen Shredderabfall auf Hausmülldeponien zugelassen sein sollte, wurde die Arbeitsgruppe „Entsorgung PCB-haltiger Abfälle“ beauftragt, sowohl Entsorgungspfade in Abhängigkeit vom PCB-Gehalt zu ermitteln als auch generelle Grenz-

wertempfehlungen zu erarbeiten. Hierzu wurde ein bundesweites Untersuchungsprogramm gemeinsam mit der deutschen Schrott-Recycling-Wirtschaft ins Leben gerufen.

Um die Behandlung von Shredderleichtmüll bundesweit zu vereinheitlichen, hat der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit eine 3. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, die sog. TA Shredderrückstände, vorbereitet. Diese Technische Anleitung wurde auf der Grundlage des § 4 Abs. 5 AbfG erstellt. In der TA Shredderrückstände wird ausgeführt, daß diese Abfälle durch thermische Behandlung in den dafür zugelassenen Anlagen zu verwerten sind. Die behandelten Abfallschlüssel sind die 57801 (Leichtfraktion) und 57802 (Rückstände aus der Entstaubung). Die TA Shredderrückstände enthält eine Reihe von Übergangs- und Ausnahmenvorschriften.

Eine Reihe von Normen und VDI-Richtlinien werden, um dem Einsatz von Recyclaten einen höheren Stellenwert zu verleihen, modifiziert bzw. neu formuliert. Als Beispiele seien die VDI-Richtlinie 2243 und Normen über die Zugabe innerbetrieblicher, sortenreiner Abfälle zu Originalmaterial genannt:

- VDI Richtlinie 2243 (Recyclinggerechtes Konstruieren)
der Entwurf der Richtlinie wird z. Zt. völlig überarbeitet und soll dem Konstrukteur Antworten auf die Frage geben, welche Forderungen das Recycling an die Konstruktion stellt. Daraus werden Leitlinien und Empfehlungen zur recyclinggerechten Produktgestaltung abgeleitet und an Beispielen erläutert. Aufgegriffen werden die Schwerpunkte Demontierbarkeit, Verträglichkeit von Altstoffen beim Recycling, Erkennbarkeit und Trennbarkeit von Werkstoffen [57].
- DIN-Norm 8061 („Rücklaufmaterial“ bei der Rohrerstellung)
- DIN-Norm 16830 („Umlaufmaterial“ bei der Fensterprofilherstellung)
- RAL-RG 716/1 („Umlaufstoff“ bei der Fensterprofilherstellung)

2.2 Organisatorische und logistische Maßnahmen

2.2.1 Duales System zur Wertstofferrfassung

Die Befreiung von der Rücknahmeverpflichtung laut VerpackungsVO ist an die u. a. Voraussetzungen geknüpft. Nach Ablauf dieser Fristen müssen definierte Mengen erfaßt und sortiert werden. Die Basisdaten weist Tabelle 2.1 aus.

Maßstab für die quantitative Erfüllung der Erfassungs- und Sortierungsquoten sind Mengenangaben der Bundesregierung. Sie ist gemäß Verpackungsverordnung verpflichtet, alle drei Jahre, erstmals zum 31. 8. 1991, das auf jeden Einwohner im Mittel entfallende Aufkommen an gebrauchten Verpackungen, aufgeschlüsselt nach Verpackungsmaterialien, im Bundesanzeiger bekanntzugeben.

Der Nachweis der tatsächlich erfaßten Anteile ist

Tabelle 2.1 Basisdaten für das Duale System [27]

Material	Menge beim Ver- braucher kg/E · a	Verluste Ver- braucher %	Rechne- risc erfaßbar kg/E · a	Am 01. 01. 1993				Am 01. 07. 1995			
				Erfassungs- quote		Sortier- quote	Verwer- tung	Erfassungs- quote		Sortier- quote	Verwer- tung
				%	kg/E · a			%	kg/E · a		
Glas	42	10	38	60	23	70	16	80	30	90	28
Papier/Pappe/Karton	15	20	12	30	4	60	2,6	80	10	80	8
Druckerzeugnisse	55	15	47	30	14	60	8,4	80	38	80	30
Weißblech	7,5	15	6,4	40	3	65	2	80	5	90	4,5
Aluminium	0,6	20	0,5	30	0,15	60	0,1	80	0,4	90	0,3
Kunststoffe/Verbunde	10	25	7,5	30	2,3	30	0,7	80	6	80	4,8
Zwischensumme	130,1		111,4		46,45		29,6		89,4		75,6
./. Druckerzeugnisse	55		47		14		8,4		38		30
Summe	75,1		64,4		32,45		21,2		51,4		45,6

1993 und 1994 von den Antragstellern (z. B. Duales System Deutschland für Abfallvermeidung und Sekundärrohstoffgewinnung mbH) jeweils bis zum 1. 3., ab 1995 jährlich bis zum 31. 12. auf der Grundlage der Einwohnerstatistik des Einzugsgebietes und des von der Bundesregierung bekanntgemachten Pro-Kopf-Aufkommens an gebrauchten Verpackungen zu erbringen.

Fristen für Verpackungen aus Kunststoffen und Kunststoffverbunden

ab 1. 1. 1993 stoffliche Verwertungsquote von 9 bzw. 6 %

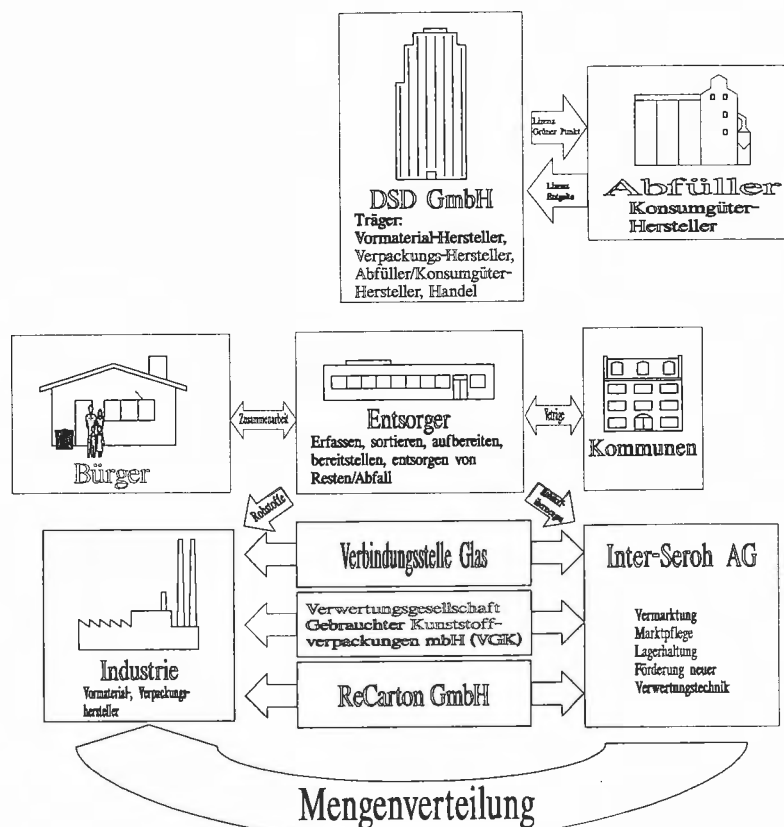
ab 1. 7. 1995 stoffliche Verwertungsquote von jeweils 64 %

Es wurde auf eine Kennzeichnungspflicht für Kunststoffe verzichtet. Damit werden Lösungsansätze für die getrennte Verwertung der verschiedenen Kunststoffsorten erschwert oder sogar verhindert. Dem Konsumenten wird folglich nicht die Möglichkeit gegeben, Kunststoffe ggf. gesondert zu sammeln bzw. besondere Verpackungen zu vermeiden.

Die Abwicklung erfolgt rein privatrechtlich außerhalb des hoheitlichen Satzungsrechtes der für Verpackungen nicht länger beseitigungspflichtigen Körperschaften.

Das Beziehungsgefüge zwischen der Duales System Deutschland GmbH (DSD), Entsorgungsunternehmen, Industrie, Bürgern und Kommunen zeigt Bild 2.1.

Bild 2.1 Aufgabenverteilung des Dualen Systems nach [27]



Das privatrechtliche Rücknahmesystem wurde vom Handel, der abfüllenden und der vormaterialliefernden Industrie mit einem Gesellschaftsvertrag ins Leben gerufen, um der Umsetzung der staatlichen Ziele zur Vermeidung und Verminderung von Abfällen zu dienen.

Die Zielsetzungen des Dualen Systems lassen sich in fünf Punkten strukturieren:

- Maximale Abfallvermeidung durch haushaltsnahe Erfassung und Verwertung der gebrauchten Verpackungen außerhalb der öffentlichen Entsorgung;
- Marktkonforme Anreize zur ökologischen Optimierung der Verpackung;
- Verbraucheraufklärung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen;
- Offenhaltung möglichst vieler Verpackungsoptionen;
- Freihalten des Einzelhandels von der Rücknahme- und Pfandpflicht für gebrauchte Verpackungen.

Das Duale System setzt sich aus drei Elementen zusammen:

- Haushaltsnahe Erfassungssysteme für Verpackungen;
- Abnahme- und Verwertungsgarantie durch Verpackungshersteller bzw. Vormateriallieferanten;
- Finanzierungssystem.

Das große Interesse der Industrie begründet sich in der Ankündigung des Handels, nach einer Übergangszeit nur noch Produkte, deren Verpackungen den Grünen Punkt tragen, ins Sortiment aufzunehmen.

Der grüne Punkt – Symbol des Dualen Systems – wird für (Kunststoff-)Verpackungen erteilt, wenn die Gebühr bezahlt wird und die Abnahme und Verwertungsgarantie einer zuständigen Gesellschaft nachgewiesen ist.

Inhaberin des ausschließlichen Nutzungsrechts an dem Grünen Punkt ist die DSD. Die Gründung der Finanzierungsinstitution fand am 28. 9. 1990 statt. Hier können Hersteller von Produkten für ihre Verkaufsverpackungen die entsprechenden Punkte, die dem Absatz eines Jahres in der Bundesrepublik entsprechen, beantragen. Damit werden auch Punkte für Verpackungen in Rechnung gestellt, die in Gebieten verkauft werden, die noch nicht an das System angegliedert sind. Dieser Profit soll für den Aufbau des Systems mitverwendet werden. Seit Januar 1991 werden die ersten Verpackungen mit dem grünen Punkt versehen. Monatlich sollen ca. 1 Mio Menschen diesem System angegliedert werden. Die Wirtschaft rechnet mit jährlichen Kosten dieser zweiten Entsorgungsschiene von 1,5 Mrd. DM.

Staffelung:

Produkte unter 50 ml oder 3 g entgeltfrei		
50 bis	200 ml =	1 Pfennig
200 bis	3.000 ml =	2 Pfennig
3.000 bis	30.000 ml =	10 Pfennig
	über 30.000 ml =	20 Pfennig

Für die Abnahme der bezeichneten Verpackung bei

den von der DSD angegebenen Sortier- und Sammelstellen und deren Verwertung muß ein Garantiegeber gefunden werden, sofern der DSD eine Garantie noch nicht vorliegt [90].

Die wesentlichen Kritikpunkte beziehen sich auf die Abnahme- und Verwertungspflicht von Importprodukten inländischer Industrien. Auch die Forderung, daß zurückgenommene Verpackungen wieder aufzubereiten sind, sowie – ein Punkt, auf den die chemische Industrie besonders hinweist – zusätzlich benötigte Anlagen zur Kunststoffverwertung erst noch vom Gesetzgeber genehmigt werden müssen, stößt auf Kritik. Auch wird die Frage laut, inwieweit der Verbraucher das Duale System mitträgt.

Befürchtungen werden auch im Zusammenhang mit dem Mehrwegsystem laut. So kritisiert der Verein „Pro Mehrweg“ die Suspensionsklausel, die die Pfand- und Rücknahmeverpflichtung der Hersteller und Anbieter aussetzt, wenn die Wirtschaft eine eigene Entsorgung betreibt. Weiterhin sieht der Verein die Gefahr einer einseitigen Beeinflussung des Verbrauchers zur Einwegverpackung, für die er im Gegensatz zur Mehrwegverpackung kein Pfand zu zahlen hat [117].

Am 18. 2. 1991 hat der Industrieverband Verpackung und Folien aus Kunststoff e.V. eine „Verwertungsgesellschaft Gebrauchter Kunststoffverpackungen mbH“ (VGK) für die Abnahme und das Recycling im dualen Abfallwirtschaftssystem gegründet. Bisher sind 22 europäische Kunststoffhersteller, 150 Hersteller von Kunststoff-Packmitteln und die Interseroh AG, Düsseldorf, Mitglieder. Das Stammkapital beträgt 2,005 Mio DM; 25,1 % wird von der Entsorgungswirtschaft, der Rest zu gleichen Teilen von der Kunststoffherzeugung und -verarbeitung getragen. Die Inter-seroh, als Vertreter der Entsorgungswirtschaft, soll die die Aufgabengebiete der Marktpflege, Lagerhaltung und Vermarktung von Recyclingprodukten sowie die Förderung neuer Verwertungstechniken abdecken. Die Branche sieht damit eine entscheidende Lücke im Dualen System geschlossen und hofft, damit restriktiveren gesetzgeberischen Verpackungsrichtlinien vorzubeugen. Die geplante flächendeckende Erfassung gebrauchter Verkaufsverpackungen durch die VGK soll die Voraussetzung dafür schaffen, daß auch Kunststoffpackmittel den Grünen Punkt erhalten können. Und der signalisiert dem ökologiebewußten Verbraucher die umweltfreundliche Weiterverwertung. Die VGK versteht sich als Koordinationsstelle zwischen der Industrie und der Inter-seroh auf dem Gebiet der Kunststoffverpackungen. Ihre Aufgabe soll es sein, von der DSD sortiert angelieferte Kunststoff-Verpackungsabfälle mit Hilfe der Entsorgungswirtschaft und dem Know-how der Kunststoffindustrie zum sinnvollen Wiedereinsatz zu verhelfen. Zur Finanzierung soll von der VDK auf jede einzelne Verpackung ein Kunststoff-Verpackungs-Pfennig erhoben werden, mit dem Verwertungsanlagen gebaut bzw. gefördert und die Vermarktung von Regranulat oder Recycling-Produkten unterstützt wird. Gleichzeitig stehen finanzielle Mittel zur Verfügung, die bei Preisschwankungen des Recyclats als Puffer dienen sollen. Die Recyclingunternehmen erhalten Zuschüsse, wenn der Preis für Neuware unter einen bestimm-

ten Level sinkt. Da die VGK als alleinige Ausgabestelle zur Bescheinigung einer Abnahme- und Verwertungs-Garantie berechtigt ist, werden alle Kunststoff-Verpackungen mit dem Grünen Punkt als Entsorgungs-Vorfinanzierungsnachweis dort erfaßt werden. Ein Aufsichtsgremium soll die Arbeit der Gesellschaft überwachen. Das Gremium setzt sich aus vier Rohstoffproduzenten, vier Verarbeitern und zwei Verwertern zusammen.

Die Kunststoffindustrie knüpft an ihre Bereitschaft, ein duales Abfallwirtschaftssystem mitzutragen, die Erfüllung folgender Forderungen:

- Möglichkeit einer Kopplung bzw. Kombinierbarkeit mit kommunalen Entsorgungssystemen. Nicht verwertbare Verpackungen müssen in die öffentlich-rechtliche Entsorgung zurückzuschleusen sein.
- Bestehende Sammel-, Sortier- und Rücknahmesysteme bleiben erhalten und werden weiter ausgebaut.
- Eine unmittelbare Einflußnahme der wiederverwertenden Industrie wird gewährleistet.
- Die Wiederverwertungsart liegt im Ermessen des VerwerTERS.
- Übernahmeverpflichtungen werden von der Genehmigungserteilung notwendiger Verwertungsanlagen abhängig gemacht.
- Zur Finanzierung des Systems soll der Letztvermarkter pro Produkt die erforderlichen Beträge abführen und dem Verbraucher als Entsorgungsbeitrag auferlegen [47].

2.2.2 Initiativen und Verbände zur Förderung des Kunststoffrecyclings

Kunststoffrecycling wird seit über 40 Jahren betriebs- und branchenintern für sortenreinen Materialabfall in Anteilen von bis zu 50 % des Rohstoffeinsatzes erfolgreich praktiziert. Die Technologie für diese Formen des stofflichen Recycling sind ausgereift und bewährt. Die Möglichkeiten zum Kunststoffrecycling sind jedoch weit umfassender als bislang praktiziert und vielfältiger als bei anderen Werkstoffklassen. Die konsequente Nutzung von gebrauchten Polymeren als Rohstoff erfordert strukturelle Veränderungen der Kunststoffherstellung von der Petrochemie zu einer Regeneratchemie. Hier besteht großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

In der Verpackungsverordnung ist die Rücknahmepflicht des Handels verankert, die Kommunen sind in diesem Bereich von ihrer Entsorgungspflicht entbunden. Die Umsetzung der Verordnung in der Praxis erfordert den Einsatz der gesamten Kunststoffbranche. Projekte zur Sammlung sortenreiner Kunststoffabfälle z. B. über den Handel werden attraktiver.

Die Anforderungen zur Aufbereitung gemischter und verschmutzter Kunststoffe aus Haushalts- und haushaltsähnlichen Gewerbeabfällen erfordern einerseits die Weiterentwicklung der Technologien und andererseits die Entwicklung und Erschließung neuer Märkte für die Recycling-Produkte.

Die folgenden Verbände und Initiativen befassen sich in verschiedenen Betriebszweigen der Kunststoffherstellung und -verarbeitung bzw. in Forschung und

Lehre mit der Förderung des Kunststoffrecycling, dies vor dem Hintergrund der unterschiedlichen branchen- bzw. produktorientierten Interessen.

Entwicklungsgesellschaft für die Wiederverwertung von Kunststoffen mbH, Wiesbaden

Die EWK wurde von den Chemie-Konzernen BASF, Bayer und Hoechst im Mai 1990 gegründet. Für den Anfang werden jährliche Gesamtkosten von 10 bis 12 Mio. DM veranschlagt. Schwerpunkte der Arbeit der derzeit 10 Mitarbeiter sind: Problemlösungen für stoffliche Wiederverwertung von Kunststoffen zu schaffen, entgegenstehende Hemmnisse (Spezifikationen, Einkaufsvorschriften, Normen, Qualitätsprobleme) zu überwinden und die Realisierbarkeit in Pilotanlagen zu demonstrieren (Gemischtkunststoffe und sortenreine Abfälle aus Chemiegebinden, Bauwesen, Altautos, Kühlmöbeln und Elektrogeräten). Gemeinsam mit anderen Branchen sollen Großtechnologien gefunden werden, die für die Verwertung von Kunststoffen geeignet erscheinen und entsprechende Pilotprojekte initiiert werden (Kunststoffabfall in chemischen Prozessen wie Pyrolyse, bei der Zementherstellung, als Brennstoff für die Klärschlammverbrennung). Einschlägige Arbeiten an Universitäten und wissenschaftlichen Instituten sollen gefördert werden.

Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e. V., Bonn

Die 1988 gegründete Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e. V., AgPU hat sich zum Ziel gesetzt, den Werkstoff PVC mit allen Belangen des Umweltschutzes in Einklang zu bringen. Dazu gehört auch, das Recycling dieses Kunststoffs flächendeckend zu organisieren und konsequent voranzutreiben (**Quelle Hrsg. AgPU, PVC-Recycling in der Praxis, Bonn 1990**). Die AgPu gibt die Schriftenreihe PCV und Umwelt heraus.

Verwertungsgesellschaft Gebrauchte Kunststoffverpackungen mbH, Frankfurt

Die VGK wurde im Februar 1991 von 22 europäischen Kunststoffherzeugern, 150 Herstellern von Kunststoff-Packmitteln und einer Entsorgungsgesellschaft mit einem Stammkapital von 2 Mio DM gegründet. Diese Trägergesellschaft soll als zentrale Institution das Recycling von Kunststoffverpackungen im Rahmen des dualen Abfallwirtschaftssystems organisieren und die Interessen der deutschen und europäischen Kunststoffindustrie gegenüber der „Duales System Deutschland GmbH“ (DSD), Düsseldorf wahrnehmen, d. h. die Abnahme und Verwertung der im System erfaßten Kunststoff-Verpackungsabfälle verantworten. Danach können Unternehmen bei der VGK eine Abnahmegarantie für von ihnen verwendete Verkaufsverpackungen aus Kunststoff erwerben, diese Abnahmegarantie ist die Voraussetzung für die Beantragung eines „Grünen Punktes“ bei der DSD. Die Arbeitsweise der VGK ist in Kapitel 2.2.1 ausführlich dargestellt [72].

Arbeitskreis Kunststoffrecycler, Frankfurt/M.

Der AKR im Gesamtverband kunststoffverarbeitende Industrie ist ein Zusammenschluß von 12 der insge-

samt rund 140 Recyclingunternehmen in der Bundesrepublik. Das Know-how in diesem Kreis umfaßt die Entsorgung, Aufbereitung und Wiederverwertung aller regranulierbaren Kunststoffabfälle. Hauptanliegen ist die Verbesserung der Absatzmöglichkeiten für das Regranulat. Die Aufbereitungskapazitäten können wegen des fehlenden Absatzes nicht ausgeschöpft werden. Die Akzeptanz von Regranulaten könnte erheblich gesteigert werden, wenn die öffentlich ausschreibenden Stellen deren Einsatz nicht weiterhin ausschließen, sondern bei nachgewiesener Tauglichkeit konsequent empfehlen würden. Für Kabelschutzrohre etwa werde in der Schweiz seit 16 Jahren ausschließlich Regenerat eingesetzt, die Bundespost schreibt den Einsatz von Neuware vor. Dieser Markt beträgt jährlich etwa 8.000 Mg. Auch für andere Verwendungszwecke könnten durch den Einsatz von Produkten aus Regranulat in öffentlichen Bereichen Vorbehalte gegen diese Produkte abgebaut werden. Die Produzenten von Regranulaten fordern Auflagen, Empfehlungen und Vorschriften, die der Kunststoffverarbeitenden Industrie den Einsatz von Regranulat-Anteilen in bereits bestehende Produktionsprozesse vorschreibt [72].

ÖKR Kunststoff-Recycling Holdinggesellschaft m. b. H., Wien

Die ÖKR wurde im Oktober 1990 mit einem Stammkapital von 57,5 Mio. öS als Tochter der S. E. H. Sonderabfall-Entsorgung Holdinggesellschaft m. b. H. gegründet. Zielsetzung des Unternehmens ist es, Möglichkeiten anzubieten, mittelfristig sämtliche in Österreich anfallenden Kunststoffabfälle zu übernehmen und in geeigneten Anlagen wiederzuverwerten. Dabei sollen alle Kunststoffsorten, d. h. Thermoplaste, Duroplaste, Standardkunststoffe und technische Spezialkunststoffe in allen Qualitätsklassen von sortenrein/sauber bis vermischt/verschmutzt übernommen werden können. Derzeit betreibt die ÖKR zwei Aufbereitungsanlagen, die sortenreine, unverschmutzte Thermoplaste zu Granulat aufbereiten. Die Errichtung bzw. der Ausbau der für diesen Aufbereitungsbereich erforderlichen Anlagenkapazitäten ist in einer ersten Phase flächendeckend für Österreich geplant. Darüberhinaus sollen in einer zweiten Phase leicht verschmutzte und in einer dritten Phase vermischte und verschmutzte Abfälle aufbereitet werden. Priorität beim Kunststoffrecycling hat dabei die stoffliche Verwertung, dabei werden Verfahren ohne chemische Umsetzung praktiziert, Verfahren mit chemischer Umsetzung (Pyrolyse, Hydrolyse, Vergasung, petrochemische Prozesse) sollen erprobt und weiterentwickelt werden. Über die technische Seite der Aufbereitung hinaus, arbeitet das Unternehmen an Konzepten zur Überwindung von Hindernissen für den Einsatz von Recyclingprodukten, zur Schließung des inländischen Kunststoffkreislaufes und zur Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe mit einer kaskadenförmigen Mehrfachnutzung mit sinkendem Nutzungsniveau. Neben der Entwicklung und Realisierung von Anlagenprojekten, der Forschung und Entwicklung, der zentralen Koordination von Sammlung und Rohstoffbewirtschaftung gründet das Unternehmen einen Arbeitskreis mit Vertretern der kunststofferzeugenden und -verarbeitenden Unternehmen. Eine Zusammenarbeit mit der ÖIWK (Österreichische Initiative Wertvoller Kunststoff) ist geplant [108].

Plastics Waste Management Institute, Brüssel

Das PWMI der APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe, in der 95 % der europäischen Kunststoffhersteller zusammengeschlossen sind) hat im April 1990 die Arbeit aufgenommen. Zu den Aufgaben zählen Koordination aller nationalen Aktivitäten von der Firmen- bis zur Verbandsebene, Initiieren und Fördern von Modellprojekten und PR-Arbeit über Stand und Möglichkeiten der Kunststoffentsorgung. Für europaweite PR-Kampagnen hat APME für 1991 einen Etat von 2,5 Mio. DM bereitgestellt. Das Institut versteht sich als Kontaktstelle zur Europäischen Kommission und arbeitet dieser in der Entstehungsphase von Richtlinien zur Kunststoffentsorgung zu [72, 34].

Kunststoff-Recycling-Zentrum-Verband, Berlin

Das Kunststoff-Recycling-Zentrum Berlin (KRZB) ist ein praxisbezogenes Forschungsinstitut, das die Projekte des Kunststofftechnikums der TU Berlin übernimmt und weiterführt und weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem Gebiet des Kunststoffrecycling durchführt. Zur Unterstützung und Förderung der Arbeiten des KRZB haben interessierte Industrieunternehmen im Januar 1991 den Kunststoff-Recycling-Zentrum-Verband gegründet. Zweck des KRZV ist die Förderung ökologisch und ökonomisch sinnvoller Wieder- und Weiterverwendungsverfahren für Kunststoffe. Es sollen alle den Lebenszyklus von Kunststoffen betreffende Schritte untersucht und auf Recycling-Anforderungen hin optimiert werden. Hierzu gehören u. a. Werkstoffauswahl, recyclinggerechtes Konstruieren von Kunststoffprodukten, Produktrecycling- und Materialrecyclingverfahren, Verfahren zum chemischen Recycling, Erfassungslogistiken und Vermarktung von Sekundärprodukten und -rohstoffen. Durch die Koordination von Wissenschaft, kommunalen Entsorgern und Industrie sollen bestehende Erfassungs-, Separier- und Recyclingverfahren optimiert und neue Aufbereitungs- und Verarbeitungsverfahren gefunden werden. Der Verband will ein Forum bieten für alle beteiligten Industriezweige, den Handel, die Entsorgungs- und Verwertungswirtschaft sowie für die beteiligten Stellen der öffentlichen Hand [73].

Kunststoff-Initiative Schleswig-Holstein

Eine Arbeitsgruppe aus Vertretern der kunststoffverarbeitenden Industrie, dem Kieler Umweltministerium und den Industrie- und Handelskammern will sich für Neuentwicklungen auf dem Recyclingsektor, energiesparende Herstellungsverfahren und Beiträge zum Umweltschutz bei der Kunststoffproduktion und -verarbeitung einsetzen. Erstes Projekt wird die Förderung der Kennzeichnung von Kunststoffen in Produkten sein, um durch verbesserte Sortierungsmöglichkeiten die Recyclingquoten zu steigern. Geplant wird die Erarbeitung einer Ökobilanz zwischen konventionellen Kunststoffen und Biopolymeren [72].

Interdisziplinäre Forschungsgemeinschaft Kunststoff e. V., Berlin

Im Rahmen der Forschungsgemeinschaft befassen sich Wissenschaftler der Geistes-, Natur- und Technikwissenschaften mit den Themenkomplexen Kunststoffe und Ökologie. Es werden Studien in Auftrags-

forschung und in Eigenforschung erstellt (z. B. Ökobilanzierungen, Technologieabschätzung), Beratungen und andere Dienstleistungen angeboten [72].

Kunststoffrecycling-Förderung durch die EG

Die EG-Kommission fördert im Rahmen eines zeitlich begrenzten Förderprogramms Kunststoff-Recycling-Produkte. Förderanträge und Informationen können bei der Generaldirektion XI Abt. AZ in Brüssel angefordert werden [72].

Wettbewerb „Produkte des Jahres“, Materialbereich „Recycling-Kunststoff“

Zur Förderung des Einsatzes von Recycling-Kunststoffen bei Konsumgütern erweitert der Fachverband Kunststoff-Konsumwaren, Frankfurt seinen alljährlichen Branchenwettbewerb „Produkte des Jahres“ um einen eigenen Materialbereich „Recycling-Kunststoff“ [72].

3. Sammlung von Kunststoffabfällen

Der Organisation zur Sammlung von Kunststoffabfällen kommt im Rahmen von Recycling-Bemühungen eine besondere Bedeutung zu. Art und Umfang der Vermischung der Kunststoffabfälle untereinander bzw. mit anderen Abfällen geben den Grad der Verschmutzung vor. Das Ausmaß der Verschmutzung wiederum bestimmt die Wirtschaftlichkeit jeder Wiederverwertungsmaßnahme.

Ziel einer auf ein Recycling ausgelegten Sammlung muß es sein, die Kunststoffe zunächst separat von anderen Müllbestandteilen beim Abfallproduzenten zu erfassen. Auf industrieller Ebene ist zudem eine Unterteilung nach einzelnen Kunststoffarten möglich und in vielen Fällen wirtschaftlich.

Grundsätzlich zu unterscheiden sind die Sammlung von Abfällen im industriellen Bereich und bei privaten und gewerblichen Kleinverbrauchern. Während industrielle Abfälle als Produktionsabfälle separat abgefahren werden und damit in recyclinggerechter Form vorliegen, entsorgen Kleinverbraucher ihre Abfälle zu meist gemeinsam mit dem übrigen Hausmüll im Rahmen der öffentlichen Abfallentsorgung.

3.1 Vermittlung durch Abfallbörsen

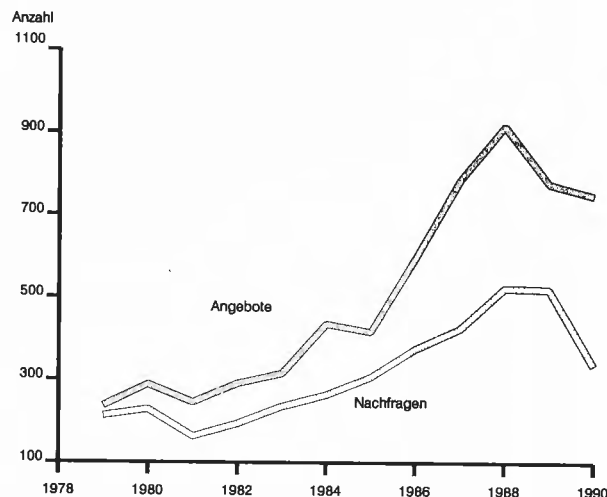
Häufig können gewerbliche Abfälle deshalb nicht recycelt werden, weil der Abfallbesitzer die Reststoffe nicht selbst verwerten kann und keine Informationen über potentielle Abnehmer besitzt. Abfallbörsen dienen der Erhöhung der Markttransparenz, um diese Reststoffe vermehrt verwerten zu können.

Abfallbörsen werden seit Anfang der 70er Jahre von verschiedenen regionalen und nationalen Institutionen betrieben. Von den Fachverbänden oder Industrie- und Handelskammern werden Informationen über Angebote und Nachfragen von Reststoffen gesammelt und an Interessierte weitergegeben. Dies erfolgt kontinuierlich durch Einzelanfragen oder periodisch durch Publikationen. Für die Zukunft ist eine Datenbank geplant. Eine Umbenennung von Abfall- zu Recyclingbörsen steht an.

Der Fachverband Technische Teile (FV-TT) im Gesamtverband der Kunststoffverarbeitenden Industrie (GKV) publizierte seine erste Restebörse im Jahre 1976. Bereits in der zweiten Veröffentlichung konnte die Zahl der Anbieterfirmen von 35 auf 54 und die angebotene Menge von 140 auf 355 Mg gesteigert werden.

Bild 3.1 zeigt die Entwicklung von Angebot und Nachfrage an der Abfallbörse beim Deutschen Industrie- und Handelstag (DIHT, Dachverband der Industrie- und Handelskammern) innerhalb der letzten elf Jahre. Die Zahl der Angebote hat sich 1990 mit 747 Angeboten gegenüber 1979 mehr als verdreifacht, während die Zahl der Nachfragen von 212 im Jahre 1979 auf 336 im Jahre 1990 gestiegen ist. Eine Auswertung

Bild 3.1 Entwicklung von Angeboten und Nachfragen hinsichtlich Kunststoffabfällen bei der Abfallbörse des DIHT zwischen 1979 und 1990 [31]



der Erfolgskontrolle für 1986 ergab, daß 1 Angebot im Mittel 2,5 Nachfragen auslöste und 1 Nachfrage 3,9 Angebote erbrachte.

Statistisch nicht erfaßt werden die tatsächlich vermittelten Abfallmengen, da sich die Tätigkeit des DIHT auf eine Weitergabe der Anschriften beschränkt. Da die überwiegende Zahl der Reststoffe nicht einmalig, sondern regelmäßig anfällt, kommen auf diesem Weg dauerhafte Firmenkontrakte zustande.

Die Spannweite der einzelnen Angebote reicht von wenigen Kilogramm Schaumstoff oder einzelnen einmalig anfallenden Kunststofffässern, über Produktionsrückstände von 15–20 Mg/Monat bis zu beliebig großen Mengen (Angebotstext: „jede Menge, regelmäßiger Anfall“) an PE/PP-Folien und Mahlgut [31].

Die Bedeutung der Abfallbörsen liegt darin, daß diese die Nutzung von Altstoffen ermöglichen, die aufgrund von Menge oder Spezifität von gewerblichen Altstoffhändlern nicht abgenommen werden. Vermittelt werden neben Stoffen, die über eine Regranulierung recycelt werden müssen, auch gebrauchsfähige Produkte, wie Leeremballagen, definierte Folien u. ä.

3.2 Sammlung von Kunststoffabfällen aus Haushalten

Die Getrenntsammlung und Verwertung gemischter Kunststoffabfälle aus Haushalten hat trotz vielfältiger Bemühungen sowie einem wachsenden „Werterhaltungsbewußtsein in der Bevölkerung“ noch keinen Durchbruch erzielt. Die in Privathaushalten anfallenden Kunststoffe werden stattdessen noch überwie-

Tabelle 3.1 Im Rahmen der öffentlichen Abfallentsorgung getrennt eingesammelte Kunststoffe und deren Verbleib im Jahr 1987 [133]

Sammlung					
insg. getrennt erfaßte Kunststoffe [Mg]		Anzahl der entsorgten Kreise und kreisfreien Städte [Anzahl]		Verhältnis zu den Kreisen im Bundesgebiet [%]	
7.743		55		17	
Art der Sammlung		[Mg]	[%]	Sortenreinheit	[Mg] [%]
Bringsystem (Depotcontainer)		2.189	28	unsortiert	3.599 47
Stationäre Annahmestelle		1.735	22	sortiert	3.901 50
Holsystem (Wertstofftonne)		1.691	22	Fremdstoffe	243 3
Sonstige Holsysteme		2.128	28		
Insgesamt		7.743	100	Insgesamt	7.743 100

Verwertung													Summen	
Kunststoffabfälle	Altstoffhandel		weiterverarbeitende Betriebe		Deponierung		Verbrennung		sonst. Anlagen einschl. Umladestationen		auf eigenes Lager genommen			
	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]
unsortiert	1.336	37	877	25	261	7	328	9	298	8	499	14	3.599	100
sortiert	473	12	2.982	76	—	—	—	—	—	—	500	12	3.901	100
Rückstände nach Sortierung	130	54	7	3	86	35	20	8	—	—	—	—	243	100

gend mit dem übrigen Hausmüll den verschiedenen Aufbereitungsanlagen zugeführt.

Man geht von einem Kunststoffaufkommen von mehr als 20 kg Kunststoff pro Einwohner und Jahr aus. Eine Entsorgung dieser Kunststoffmenge auf Deponien beansprucht, aufgrund des geringen spezifischen Gewichts, ein Deponievolumen von 23 Vol.-% der Haushaltsabfälle. Der Kunststoffanteil im Haushaltsabfall beansprucht aufgrund seines Energiegehaltes mehr als ein Drittel der Verbrennungskapazität, so daß eine stoffliche Verwertung geboten scheint [127].

Nach einer, von der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e. V. beim Institut für Demokratische Demoskopie Allensbach, in Auftrag gegebenen Repräsentativbefragung der deutschen Bundesbürger sind 70 % der Verbraucher bereit, Kunststoffe aus dem Hausmüll getrennt zu sammeln, wenn von den Kommunen Mülltonnen oder Kunststoffsäcke zur Verfügung gestellt werden. Dabei steht die Bereitschaft in enger Korrelation mit der Angabe von konkreten Handlungsanleitungen. Noch 35 % der Befragten sind bereit, Kunststoffe nach Sorten zu trennen. Sinnvoller als eine Materialkennzeichnung der Verpackungen erscheint den Verbrauchern die Angabe, welche Verpackung wiederverwertet werden kann und in welche Tonne sie zu geben ist.

Im Rahmen der öffentlichen Abfallentsorgung werden Kunststoffe in zunehmendem Maße getrennt eingesammelt bzw. abgegeben. Das statistische Bundesamt hat diese Daten erstmals für 1987 erhoben. Tabelle 3.1 zeigt die Art der Sammlung und den Verbleib der eingesammelten Mengen.

Während kurzzeitig die Rückgewinnung von Kunststoffen aus gemischtem Hausmüll favorisiert wurde,

verfolgt man heute, zugunsten besserer Produktqualitäten, mehr und mehr die verschiedenen Konzepte der Getrenntsammlung. Bild 3.2 zeigt eine Übersicht zu Systemen der Getrenntsammlung.

Bringsysteme sind additive Systeme, die unabhängig von der konventionellen Abfallsammlung funktionieren. Sie basieren auf der freiwilligen Bereitschaft der Bevölkerung, ihre Wertstoffe zu den Sammelstellen hinzubringen.

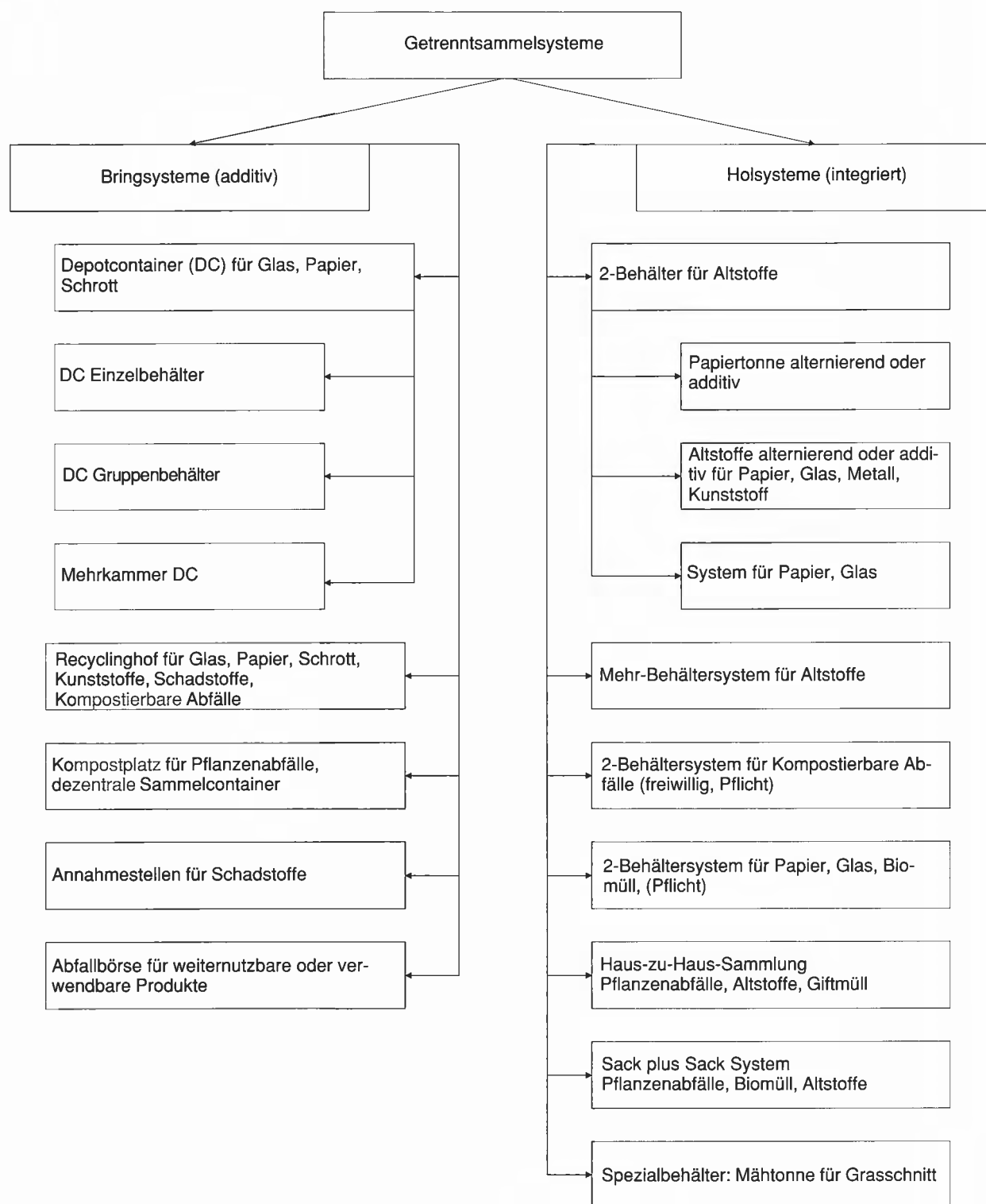
Holsysteme sind integrierte Sammelsysteme zur Wertstoffeffassung und erfordern eine weitgehende Umstellung der konventionellen Abfallsammlung, da statt ehemals einer einzigen Abfalltonne zumeist mehrere verschiedene Müllbehälter zum Einsatz gelangen. Ein Teil der Behälter dient der Wertstoffeffassung, während die nicht zu verwertenden Reststoffe in die „Restmülltonne“ gelangen und den konventionellen Abfallentsorgungsanlagen zugeführt werden. Wert- und Reststoffe werden parallel oder alternierend von den Abfallentsorgern abgeholt.

3.2.1 Holsystem

Im Holsystem erfolgt die Umstellung der Abfallsammlung flächendeckend für ein bestimmtes Gebiet von einem auf mehrere Sammelgefäße. Die Variationsbreite der Tonnenanzahl ist dabei beliebig groß. So sind 2-Behälter- oder 5-Behälter-Systeme bei gleichzeitiger oder alternierender Abfuhr der Behälter zu unterscheiden, mit gemeinsamer oder getrennter Sammlung verschiedener Wertstoffe oder der Möglichkeit der Verwendung von Einweg-Sammelgefäßen (Kunststoff- oder Papiersäcken) für einzelne Wertstoffe.

Kunststoffe werden dabei entweder in einem Wert-

Bild 3.2 Übersicht zu Systemen der Getrenntsammlung in der öffentlichen Müllabfuhr [127]



stoffgemisch mit Papier/Pappe, Glas oder Metallen erfaßt (Wertstofftonne) oder werden separat in Behältern oder Beuteln von jedem Haus oder Haushalt einzeln eingesammelt.

Der erforderliche Sammelaufwand der an dieses System angeschlossenen Einwohner ist gering. Mit dem Holsystem läßt sich im Vergleich zum Bringsystem eine größere Menge an Kunststoffen erfassen. In ei-

nem Versuchsgebiet, in dem Kunststoffe separat in Beuteln gesammelt wurden, lag die Erfassungsmenge bei 13,5 kg/E • a. Dies entspricht etwa 43 % der im Hausmüll enthaltenen Kunststoffe [56]. Die bei diesem Versuch ermittelte Zusammensetzung der gesammelten Kunststoffe ist in Tabelle 3.2 angegeben. Der Anteil an PE/PP ist mit 44 % geringer und der von PS mit 25 % höher als in vergleichbaren Untersuchungen (vgl. Kapitel 1.5.1).

Tabelle 3.2 Ergebnisse einer Sortieranalyse im Holsystem in Hamburg-Bergedorf im Herbst 1986 [56]

Kunststoffart	Anteil Gew.-%
PE/PP	44
PS	25
PVC	15
Sonstige	12
Fremdstoffe	4
Gesamt	100

Tabelle 3.3 Ergebnisse einer Sortieranalyse im Bringsystem in Hamburg-Bergedorf im Herbst 1986 [56]

Kunststoffart	Anteil Gew.-%
PE/PP	56
PS	19
PVC	13
Sonstige	9
Fremdstoffe	3
Gesamt	100

Die Kosten, die durch den höheren Sammelaufwand anfallen, hängen entscheidend von der Art des Systems ab. So werden bei den verschiedenen Variationen der „Grünen Tonne“ zusätzliche Kosten von 7,50 bis 14 DM/E • a bzw. 91 bis 160 DM/Mg Wertstoff (Basis: 1984/85) genannt. Dies gilt jedoch im Mittel aller erfaßten Wertstoffe, wobei die geringe Dichte der Kunststoffe tendenziell zu einer Erhöhung der massenspezifischen Sammelkosten führt [126]. Kosten für eine Sortierung vermischter Kunststoffe sind nicht enthalten.

Bei der separaten Sammlung von Kunststoffen in zusätzlichen Säcken parallel zur Hausmüllabfuhr wurden in einem Pilotprojekt in Hamburg-Bergedorf Kosten von knapp 2.500 DM/Mg entsprechend ca. 180 DM/E • a ermittelt [9]. In anderen Versuchen werden Kosten von 2.000–3.000 DM/Mg genannt. Dies macht deutlich, daß eine Aufbereitung von Kunststoffabfällen auf Grundlage der Beutelsammlung im Holsystem nicht kostendeckend durchführbar ist. Derartige Versuche wie in Hamburg werden i. d. R. nicht als Dauereinrichtungen weitergeführt.

3.2.2 Bringsystem

Das Bringsystem wird punktuell durch Aufstellung von Depotcontainern an zentralen Standorten zur Sammlung von einem oder mehreren Wertstoffen eingerichtet. Die Wertstoffe müssen zu den Containern gebracht und eingeworfen werden. Die Größe der Container beträgt zwischen 0,5 und 5 m³.

Die Sammlung der Wertstoffe im Bringsystem erfordert eine höhere Motivation der Bevölkerung als beim Holsystem. Dementsprechend geringer ist zumeist die tatsächliche Beteiligungsrate.

Die Sammelmenge bezogen auf die Einwohner des Sammelgebietes betrug bei einem Versuch 1986 in Hamburg zwischen 0,5 und 1,5 kg/E • a ($\hat{=}$ 3 % bis 8,5 % der im Abfall enthaltenen Kunststoffe) [56]. Das jeweilige Sammelergebnis wurde hierbei im wesentlichen vom Einzugsgebiet des einzelnen Containers beeinflusst. Die geringste spezifische Sammelmenge ergab sich bei aufgelockerter Bebauung und einer Containerdichte von > 4.000 E/C (Einwohner/Container). Die höchsten Sammelmengen ergaben sich in einem innerstädtischen Gebiet mit einer Containerdichte < 2.000 E/C, sowie bei einer teilgewerblichen Nutzung der Container. Die geringe spezifische Erfas-

sungsquote im Vergleich zum Holsystem ist hauptsächlich auf die verhältnismäßig geringe Beteiligung der Bevölkerung an der Sammlung zurückzuführen. Die am Bringsystem tatsächlich beteiligten Einwohner wiesen jedoch mit 11,5 kg/E • a ein fast ebenso großes Sammelergebnis auf, wie die Teilnehmer am Holsystem. Die Zusammensetzung der gesammelten Kunststoffe gibt Tabelle 3.3 wieder. Die PE/PP-Fraktion liegt mit 56 % zwar höher als im Holsystem, jedoch immer noch unter den Werten der Vergleichsanalysen (vgl. Tab. 1.6).

Detaillierte Angaben über Sammelkosten von Kunststoffen im Bringsystems sind nicht bekannt. Nach Schätzungen betragen diese jedoch 600–1.100 DM/Mg [127]. In der Regel ist die Verwertung der Sammelware noch nicht kostendeckend möglich.

Die Entsorger haben in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Systemen zur Getrenntsammlung erprobt und dabei vielfältige Erfahrungen gesammelt:

- alle erprobten Systeme haben Vorteile (bequem) und Nachteile (teuer). So zeigt sich deutlich, daß mit wachsenden Erfassungsquoten die Kosten steigen (steigende Grenzkosten);
- während in einzelnen Versuchsgebieten in der Regel sehr zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, ist bei einer Ausweitung auf alle Gemeinden und mit zunehmender Versuchsdauer mit Motivationsdefiziten zu rechnen;
- hemmend für die praktische Umsetzung sind die unterschiedlichen Interessen. So führt die zur Getrenntsammlung unmotiviert Minderheit zur merklichen Steigerung des Aufwands. Praktische und organisatorische Probleme bei der Umstellung des Fuhrparks sind oft Ursache für wachsende Widerstände der Bevölkerung bei der Systemumstellung;
- Gegebenheiten der Baustruktur erschweren die getrennte Erfassung der Wertstoffe, in dichtbesiedelten Gebieten ist die Aufstellung weiterer Sammelgefäße problematisch, in kleinen Küchen kann Platzmangel die Aufstellung weiterer Sammelgefäße behindern.

Ein weitgehendes Recycling von Kunststoffen aus Haushalten scheitert bislang aus den folgenden Gründen:

- Fehlen von flächendeckenden effizienten Sammel-

Kunststofffraktion	Anteile in [%]			Aufkommen [kg/E · a]
	mittel	min.	max.	
Folien	36,0	5,0	52,3	0,748
flaches Material	8,2	1,4	19,2	0,179
rollende Behälter	7,6	6,4	10,0	0,165
nicht rollende Behälter	8,3	6,3	10,9	0,181
Behälter > 30 cm	12,3	7,8	20,8	0,268
Behälter < 10 cm	3,1	1,4	5,7	0,068
Joghurt-/Margarinebecher	15,7	8,6	25,6	0,343
massive Teile	7,1	1,1	21,6	0,155
Schäume und Styropor	1,7	0,3	3,8	0,037
Summe				2.180

Tabelle 3.4 Anteile und Aufkommen der Kunststofffraktion in Radolfzell-Böhringen [151]

systemen, hohe Sammel- und Transportkosten aufgrund des geringen Schüttgewichtes;

- fehlende Technologien um verunreinigte und gemischte Kunststoffabfälle aus Haushalten wirtschaftlich aufzuarbeiten;
- beschränkter Anwendermarkt für recycelte Kunststoffe wegen der Heterogenität des Materials mit teilweise unvorhersehbaren Eigenschaften bei Verarbeitung und Endprodukt.

3.3 Beispiele für die Sammlung von Kunststoffen aus Haushalts- und Gewerbeabfällen

3.3.1 Sammlungen in der Bundesrepublik Deutschland

1980

Radolfzell-Böhringen: 3-monatiger Versuch mit separat bereitgestellten Kunststoffsammeltüten. Die Abholung der gefüllten und Lieferung der neuen Sammelbeutel erfolgte wöchentlich. Die durchschnittliche prozentuale Zusammensetzung sowie die gewichtsbezogene Verteilung der Kunststofffraktion zeigt Tabelle 3.4.

1984/87

Hamburg-Bergedorf: Pilotprojekt zur Kunststoffsammlung. Durch die Stadtreinigungsbetriebe wurden an die Haushalte Säcke zur getrennten Kunststoffsammlung verteilt. Außerdem standen in Teilen von Bergedorf 1,1 m³ Container für die Sammlung bereit. Die Säcke wurden wöchentlich eingesammelt. Ab Dezember 1985 wurde die Sammlung von 4.000 auf 8.000 Haushalte ausgedehnt. Im Rahmen des Pilotprojekts führte INTECUS eine qualitative und quantitative Abfallanalyse durch. Dazu wurden bei ausgewählten Haushalten Art und Menge der gesammelten Kunststoffe bestimmt und mit deren soziologischen Daten verglichen.

Im Holsystem wurde eine Menge an Kunststoffen von 262 g/Einwohner/Woche erfaßt. Der Verschmutzungsgrad der Kunststoffe im Holsystem war als sehr gering zu bezeichnen.

Im Bringsystem wurde von den untersuchten Haushalten eine ähnlich große Menge an Kunststoffen gesammelt (220 g/Einwohner/Woche). Die geringe Beteiligung der Bevölkerung führte jedoch zu einer Erfassung von nur 12–32 g/Einwohner/Woche bezogen auf alle Einwohner des untersuchten Gebietes. In den

Containern wurde ein höherer Anteil (10 Gew.-%) an Fremdstoffen (Mülltüten, Dosen, Steinen etc.) festgestellt als in den für diese Untersuchung ausgegebenen Kunststoffbeuteln aus den am Bringsystem beteiligten Haushalte.

Saisonale Schwankungen hinsichtlich der Menge und Zusammensetzung der Kunststoffe lagen im Bereich der statistischen Unsicherheit und konnten somit nicht quantifiziert werden. Einflüsse durch den Wohnbereich auf die Sammelleistung der Teilnehmer blieben wider Erwarten innerhalb enger Grenzen. Die Größe des Haushalts spielt dagegen für die zu erwartende Sammelmenge eine entscheidende Rolle. Aus einem 1-Personenhaushalt kamen im Schnitt beider Sammelssysteme mit knapp 450 g/Woche mehr als doppelt soviel Kunststoffe wie aus einem 4–5 Personenhaushalt, der eine spezifische Kunststoffmenge von 205 g/Einwohner/Woche aufwies. Unabhängig vom Sammelssystem war die Sammelleistung der teilnehmenden Akademiker mit 308 g/Einwohner/Woche deutlich höher als die der übrigen Teilnehmer mit 152 g/Person/Woche.

Die Verteilung der gesammelten Kunststoffe auf einzelne Kunststoffarten ist Tabelle 3.5 zu entnehmen. Diese Verteilung ist einerseits beim Holsystem und beim Bringsystem unterschiedlich und unterscheidet sich andererseits von den Angaben in der entsprechenden Literatur und den Statistiken.

In der Anfangsphase bestand ein Abnahmevertrag mit der Fa. Recycloplast, welche die Kunststoffabfälle verwertete (Erlös: 100,- DM/Mg).

Tabelle 3.5 Verteilung der Kunststoffarten bei getrennter Sammlung

Parameter	Literatur	Holsystem	Bringsystem
Polyolefine	67 %	46 %	58 %
Polystyrol	16 %	26 %	20 %
PVC	12 %	16 %	13 %
Sonstige	5 %	12 %	9 %
Summe	100 %	100 %	100 %

Wirtschaftlichkeit [151]:

Erlös für 300 Mg	30.000,— DM
Unterhalt für 20 Container	9.280,— DM
Paketierung, Lagerung	87.780,— DM
Kosten für 415.000 Säcke	80.000,— DM
Verteilung der Säcke	27.000,— DM
Gesamtkosten	204.060,— DM

Bis zur endgültigen Vermarktung (Verwertung durch die Fa. Recycloplast, Pyrolyse oder Verbrennung) wurden die Kunststoffe zwischengelagert.

1989

Bundesweit: Repräsentativbefragung der deutschen Bundesbürger über Fragen der Sammlung von Kunststoffabfällen aus Haushalten.

Ausgangspunkt der Untersuchung war ein Konzept für ein umfassendes Recycling von Kunststoffabfällen, speziell PVC-Abfällen, das von der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (AgPU) initiiert wurde. Das Konzept bezweckt die Organisation der getrennten Erfassung von Kunststoffverpackungen zugunsten einer stofflichen Verwertung.

Die Befragung von 2.591 repräsentativ ausgewählten Personen ergab, daß etwa 70 % der bundesdeutschen Verbraucher bereit sind, Kunststoffabfälle separat zu sammeln. Voraussetzung sei jedoch die kostenlose Bereitstellung entsprechender Behältnisse von Seiten der Kommune. Bei immerhin 35 % der Bevölkerung besteht ferner die Bereitschaft, die Kunststoffe sogar nach Sorten zu trennen. Allerdings halten nur 10 % der Befragten eine Materialkennzeichnung für sinnvoll. Wichtig sei vielmehr zu wissen, „welche Verpackung in welchen Sammelbehälter gegeben werden solle“.

Die Umfrage zeigte darüberhinaus, daß bislang nur 13 % der Städte und Gemeinden Kunststoffabfälle sammeln. Die Kommunen haben nach wie vor erhebliche Probleme mit der Vermarktung der Kunststoffabfälle. Die Motivation der Städte und Gemeinden zur getrennten Sammlung von Kunststoffabfällen ist durch die ungeklärte Aufbereitung der Abfälle erheblich gebremst.

1990

Bielefeld/Herford: Im Rahmen des Recycling-Großprojektes (Abfallentsorgungszentrum Bielefeld/Herford) soll auch das Kunststoffrecycling eine erhebliche Rolle spielen. Mehrere Kunststoffhersteller und Entsorger planen gemeinsam, Recycling gemischter Kunststoffe aus dem Hausmüll und hausmüllähnlichem Gewerbemüll beispielhaft durchzuführen.

Das „Modell Bielefeld/Herford“ sieht vor, nahezu den gesamten entstehenden Kunststoffabfall (ca. 7.000 Ma/a) einer Wiederverwertung zuzuführen.

Durch ein integrales Sammelsystem wird das Heraus-sortieren sortenreiner Kunststoffanteile ermöglicht.

1990

In der ehemaligen DDR wurden bei der Erfassung von Kunststoffabfällen aus Haushalts- und Gewerbeabfällen im wesentlichen zwei Wege beschritten.

In größeren Handelseinrichtungen (Kaufhallen) wurde

ein Bringsystem praktiziert. Dieses System diene der flächendeckenden unentgeltlichen Rückführung von Kunststoffverpackungen (Flaschen und Behälter für Haushaltschemikalien und Lebensmittel). In den Kaufhallen wurden zu diesem Zweck Netzgebinde aufgestellt. Ausschlaggebend für die Wahl von Netzcontainern statt geschlossener Container war der geringere Fremdstoffanteil. Die Entleerung der Container übernahmen vielfach private Altstoffhändler.

Bei der Sammlung mit Netzcontainern erreichte man eine Kunststoffmischung mit einem Polyolefinanteil von 80 %. Trotz des flächendeckenden Erfassungssystems wurden aber nur bis zu 25 % (1989: 10.400 Mg) des Aufkommens erfaßt.

Darüberhinaus bestand die Möglichkeit, gegen ein geringes Entgelt (0,03 Mark pro Stück bzw. 1,00 Mark je kg Altstoff) die entsprechenden Altstoffe zu einer der Sekundärrohstoffaufkaufstellen (Sero-Erfassungsstellen) zu bringen. Diese wurden von privaten oder staatlichen Einrichtungen betrieben. Dieses System wurde stark subventioniert und konnte aus wirtschaftlichen Gründen nicht aufrechterhalten werden.

Die Altkunststoffe wurden in regionalen Einrichtungen des Kombinate Sekundärrohstoffe auf Schneidmühlen grob zerkleinert und auf diese Weise kompaktiert. Das Mahlgut wurde in Faltcontainern für einen Abgabepreis von 1.300 Mark/Mg den Aufbereitungsbetrieben zugeführt. Dazu erhielt der Altstoffhandel eine staatliche Subvention von 1.650 Mark/Mg. Im Zuge der Einführung der Marktwirtschaft wurde die Subvention auf 33 % reduziert. Daraufhin stellte der Altstoffhandel seine Tätigkeit ein, und das Erfassungssystem brach zusammen [134].

1990

München: Im Rahmen eines Pilotprojekts „Recycling von Joghurtbechern“ werden Polystyrol- und Polypropylen-Becher von den Verbrauchern zurückgegeben und recycelt.

Ausgangspunkt für die Umsetzung eines solchen Projektes sind geschätzte Mengen von 150 Mio. Stück oder 2.500 Mg Kunststoffabfälle, die jährlich allein in München anfallen. Bei der Herstellung von Joghurtbechern ist es möglich, bis zu 60 % Recyclematerial als lichtschützende und zugleich stützende Mittelschicht, die nicht mit dem Produkt in Berührung kommt, wiederzuverwenden. Somit ist eine Verminderung von bis zu 60 % Rohstoffe je Jogurtbecher zu erzielen.

Im August 1989 erzielte die Großmolkerei Müller mit einem Vorprojekt im Landkreis Aichach-Friedberg schon nach kurzer Zeit eine Rücklaufquote von 40 %, obwohl nur Polystyrolbecher gesammelt wurden.

Der Großtest wird von der Stadt München in Zusammenarbeit mit der Molkerei Müller und zwei Großmärkten in der Stadt München durchgeführt. Dieser Test soll Aufschluß über die Sammelbereitschaft der Verbraucher sowie deren Bereitschaft zur „Vorbehandlung“ der gebrauchten Becher geben. So sollen die Becher vom Aluminiumdeckel befreit und mit Wasser ausgespült werden, bevor diese in die Sammelbehälter eingeworfen werden.

Geplant ist, den Test bei positivem Verlauf auf die ganze Stadt München und später auch auf andere Regionen auszudehnen.

1989

Coburg/Blumenrod: Kunststoffrecycling aus Kunststoffen der „Grünen Tonne“ im Zweckverband Nord-West-Oberfranken. Nachdem bereits 1982 erste Versuche zur getrennten Sammlung anliefen, werden inzwischen 280.000 Einwohner über eine Kombination von grauer Tonne für Reststoffe und grüner Tonne für Wertstoffe entsorgt. Ebenfalls können Industrie- und Gewerbeabfälle sowie der Inhalt aus Depotcontainern verarbeitet werden. In der Wertstoffsortieranlage wird der Inhalt der grünen Tonne u. a. nach Kunststoffen getrennt. Diese werden in der benachbarten AKW Kunststoffaufbereitungsanlage entweder vermischelt oder getrennt aufbereitet. Der Preis des Regranulats ist abhängig vom Preis des Inputmaterials. Bei Kosten für die Aufbereitung von derzeit 0,60 DM/kg Regranulat ist weiterhin mit einem wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu rechnen.

1990

Hofheim/Main-Taunus-Kreis: Kunststoffabfälle können getrennt von anderen Haushaltsabfällen gesammelt und im Holsystem entsorgt werden. Für 1,50 DM kann der Verbraucher einen 80 l-Sack erwerben, in dem die Kunststoffabfälle gesammelt und einmal pro Monat abgeholt werden. Zur Kostendeckung zahlt die Stadt jeweils 3,30 DM je Sack zusätzlich an das Entsorgungsunternehmen. Der Test steht in Verbindung mit der neuen Konzeption der Hofheimer Abfallwirtschaft.

1990

Frankfurt: Das Modellprojekt „Getrennte Sammlung von Kunststoffabfällen“ soll Vorbildcharakter für gleiche Aktionen anderer Städte und Verbände haben.

Vertreter des Chemieunternehmens Hoechst erklärten ihre Bereitschaft zur Wiederverwertung von in gesonderten Tonnen gesammelten Kunststoffabfällen.

1989

Niederolm/Mainz-Bingen: Getrennte Sammlung von Plastikmüll nach dem Holsystem mit einer Beteiligungsquote von 80 % der Haushalte.

1990

Langen: In Zusammenarbeit mit Städten und Gemeinden im Großraum Frankfurt, Offenbach und Darmstadt werden in einem Gebiet von ca. 850 km² Kunststoffabfälle aus Haushalten gesammelt. Vermischte Kunststoffe von rund 500 Mg/a werden in einer Aufbereitungsanlage der Firma REAL z. B. zu Latten und Pfählen extrudiert. Die Betreiber-Firma Multi-Products (MP) hat 20 Depotcontainer vorwiegend auf städtischen Bauhöfen aufgestellt, im Kreis Offenbach soll zusätzlich eine Sacksammlung eingeführt werden. Von diesem Holsystem erhofft sich der Betreiber Kunststoffabfälle mit geringeren Fremdstoffanteilen und Verunreinigungen. Über 50 Städte und Gemeinden haben Interesse an dieser Form des Kunststoffrecyclings aus Haushaltsabfällen bekundet.

1990

Im Rahmen einer Untersuchung zum „Stand der Ab-

Tabelle 3.6 Spezifische Altkunststoffmengen nach Sammelsystemen 1988 in kg/E • a [50]

Sammelsystem	ϕ [kg/E, a]	ländlich [kg/E, a]	städtisch [kg/E, a]
Mehrkomponenten-Wertstofftonne	1,44	1,39	1,58
Vereinssammlung	1,14	1,14	k. Angabe
Container	0,84	0,84	k. Angabe

fallverwertung in Bayern“ wurden alle 96 bayerischen Landkreise und kreisfreien Städte befragt. Die erfragten Daten beziehen sich auf das Stichjahr 1988.

So wurden 1988 in Bayern 2.688 Mg Altkunststoffe aus Haushalten und landwirtschaftlichen Betrieben erfaßt, die verwertet werden konnten. Diese Menge entspricht einer spezifischen Sammelmenge von im Mittel 0,54 kg/E • a beziehungsweise einer Potentialabschöpfung von Altkunststoffen entsprechend 1,5 %. Die recycelten Mengen bestanden zu ca. 70 % aus Folien, 30 % aus gemischten Kunststoffen und 1 % aus Styropor. Die Untersuchung ergab, daß Altkunststoffe bisher vorwiegend im ländlichen Bereich gesammelt wurden, wo der Sammlung von Folienabfällen, insbesondere aus der Landwirtschaft, bei lokal günstigen Verwertungsmöglichkeiten, steigende Bedeutung zukommt.

Der Erfolg der Kunststofferfassung ist bisher bei allen Sammelsystemen gering. Eine Potentialabschöpfung von mehr als 10 % läßt sich nicht erreichen. Aus der Tabelle 3.6 ist zu entnehmen, daß die besten Sammelergebnisse mit der Mehrkomponenten-Wertstofftonne erzielt werden, gefolgt von den Vereinssammlungen und der Containersammlung.

Im Bild 3.3 ist die Erfassungsquote der Sammelsysteme für Kunststoffe bezogen auf das Gesamtpotential dargestellt.

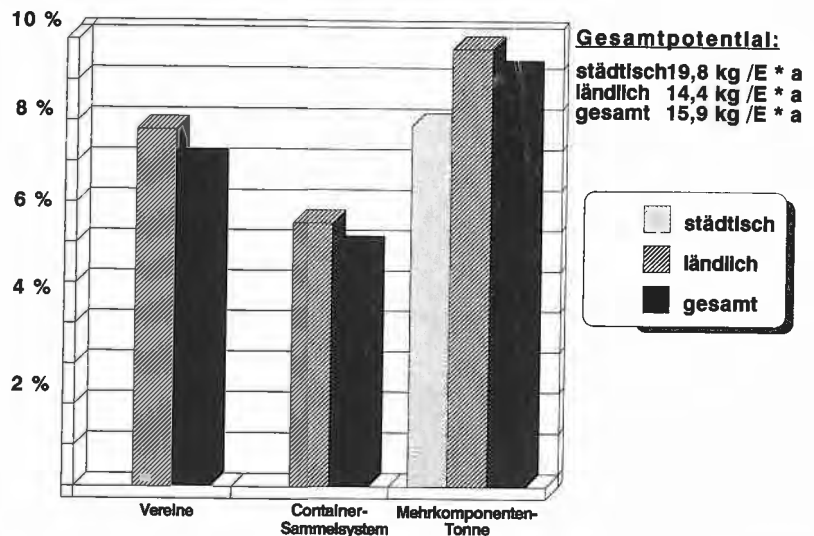
1990

Berlin: Die Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt e. V. (AgVU) führte in Zusammenarbeit mit der Berliner Stadtreinigung (BSR) mit wissenschaftlicher Begleitung durch das Kunststofftechnikum Berlin von März bis Dezember 1989 den „Berliner Kunststoffrecycling-Test“ durch.

Erfaßt wurden insgesamt 10.000 kg PE-Weichspüler- und Flüssigwaschmittelverpackungen, PE-Farbeimer, PET-Speiseölf Flaschen und andere nicht zur Erfassung vorgesehene Kunststoffverpackungen. Es wurden fast ausschließlich Verpackungen aus HDPE, nur 165 kg PET und 314 kg andere Kunststoffe – als Fehlläufer bezeichnete Fraktion – aus PS und PVC erfaßt. Unterstützende Maßnahmen waren:

- eindeutige Kennzeichnung der Produkte bzw. eindeutige Identifizierung der Kunststoffarten durch den Verbraucher;
- sortenreine Sammlung im Bringsystem und geregelte Annahme auf Recyclinghöfen;

Bild 3.3 Erfassungsquote bei verschiedenen Sammel-systemen für Altkunst-stoffe 1988 [50]



- intensive Unterstützung durch PR-Maßnahmen;
- Kostenminimierung des Ablaufs Sammlung – Transport – Aufbereitung durch organisatorische Maßnahmen.

Die Berliner Handelsketten nahmen nahezu geschlossen an dem Versuch teil. Die Verarbeitung der Kunststoffe und die wissenschaftliche Begleitung des Projekts erfolgte durch die Technische Universität. Für die Öffentlichkeitsarbeit und die anderen unterstützenden Maßnahmen war die AgVU verantwortlich. Die BSR stellte die Sammelcontainer und übernahm den Transport zum Kunststofftechnikum.

Die Gesamtdauer des Projektes, das vom BMFT mit 780.000,- DM gefördert wurde, betrug 26 Monate.

Der Vorteil dieser Einengung der Kunststofffraktion liegt in der größeren Sortenreinheit ohne maschinellen Aufwand sowie in dem hohem Stückgewicht, das bei PE zwischen 60 und 900 g und bei PET zwischen 30 und 50 g beträgt [38,39].

Nachteilig ist demgegenüber, daß der Anteil dieser Verpackungen an der Kunststofffraktion des Haus- und Gewerbemülls deutlich kleiner als 5 % ist. Realistisch lassen sich mit diesem Verfahren vermutlich nicht mehr als 1 % der Kunststoffabfälle (was etwa 0,06 % des gesamten Haushaltsabfalls ausmacht) einer Verwertung zuführen.

Auf folgende Fragen sollten die Ergebnisse des Feldversuches Antwort geben:

1. Wie sortenrein können die Stoffgruppen bei Kennzeichnung separat erfaßt werden?
2. Welche Rücklaufquoten sind erreichbar, wenn die Produkte gekennzeichnet sind, und wie wirkt sich eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit aus?
3. Können diese Stoffe mit minimaler Aufbereitungstiefe regranuliert und bei der Neuproduktion eingesetzt werden? Wie läßt sich der Einbau von Füllgutresten realisieren und wie kann Qualität garantiert werden?

4. Welche neuen Anwendungsfelder können erschlossen werden?
5. Welche wirtschaftlichen Randbedingungen sind zu erwarten?

Die Auswertung der Sammelergebnisse zeigte die folgenden Ergebnisse:

1. Eine Kennzeichnung der Verpackungen hilft tatsächlich, den Verbraucher zur Sammlung zu bewegen und an der Sammelstelle sortenreinere Fraktionen zu erhalten. Bereits vom Hersteller gekennzeichnete Verpackungen weisen dabei einen deutlich besseren Rücklauf auf als vom Handel mit Aufklebern gekennzeichnete Verpackungen. Die Mitarbeiter der 15 beteiligten BSR-Recyclinghöfe wurden durch Schulungen mit den Produkten vertraut gemacht und erhielten Listen, in denen die zu sammelnden Produkte aufgeführt waren. Durch diese Vorbereitung und die nahezu kontinuierliche Information der Verbraucher nahm die Menge der Fehlsammlungen im Zuge der Sammelphase kontinuierlich ab. Fehlsammlungen traten vermehrt bei optischer Ähnlichkeit von Testfraktionen mit anderen Verpackungen auf. Aussagen zur Wirkung eines Pfandsystems auf den Verpackungsrücklauf konnten nicht getroffen werden.
2. Der Test war durch intensive PR-Maßnahmen in den Tageszeitungen, Plakat- und Broschürenwerbung in den Filialen des beteiligten Einzelhandels und auf Plakatwänden sowie ein Info-Telefon bei der BSR begleitet. So wurden Informationen über Zielsetzung des Versuchs, Lage und Öffnungszeiten der Recyclinghöfe dem Verbraucher zugänglich gemacht. Um nähere Informationen über die Teilnehmer zu erhalten, wurden auf den Recyclinghöfen Fragebögen ausgegeben, deren Rücklauf durch ein angegliedertes Preisausschreiben gestützt wurde. In der Phase der Werbung von März bis Mai 1990 wurden die höchsten Rücklaufquoten erzielt; ohne die Werbeaktivitäten ging der wöchentliche Rücklauf zurück. Wichtigste Aussage der Auswertung war die Erkenntnis, daß neben

ausreichender Information auch bequeme Entsorgungsmöglichkeiten geboten werden müssen. Die Bewohner von Einfamilienhäusern nutzten dieses Angebot am intensivsten, 3–5 Personen-Haushalte nutzen das Angebot in starkem Maße, 1-Personen-Haushalte nur gering. Die Kennzeichnung der Verpackungen motivierte zur Sammlung, eine weitere Kennzeichnung auch anderer Kunststoffverpackungen wird gewünscht.

Das Sammelzwischenergebnis betrug im Versuchszeitraum bis Anfang November

- 7,7 Mg Kunststoffe, davon
- 3,7 Mg Farbeimer (70 % PE, 4 % Papier, 4 % FE, 22 % Farbe),
- 3,1 Mg Weichspüler-/Waschmittelflaschen (58 % PE, 22 % PP (Deckel), 2 % Papier, 18 % Füllgutreste (13 % Wasser, 5 % Waschsubstanzen))
- 156 kg PET.

Daneben fielen im gleichen Zeitraum 560 kg sonstige PE-Behälter, 185 kg PVC und 95 kg sonstige Kunststoffe an. Der Anteil der Fehlsortierung lag – gemittelt über alle Fraktionen – bei ca. 10 %. Bei einem geschätzten Aufkommen von ca. 1.000 bis 1.500 Mg im Versuchszeitraum lag die Rücklaufquote unter 1 %. Dabei ist zu berücksichtigen, daß zu Beginn des Versuchs nur zwölf Recyclinghöfe mit einer Dichte von rund 170.000 E/Hof zur Verfügung standen. Die Schüttdichte der Weichspüler- und Flüssigverpackungen betrug im Höchstfall 0,03 Mg/m³.

3. Kosten können um 25 %, der Zeitaufwand um 40 % gesenkt werden. Diese Optimierung wird erreicht durch

- Trennung der Einzelfraktionen bei der Sammlung im Bringsystem,
- Verzicht auf Materialwäsche,
- Zerkleinerung im Shredder statt in einer Mahlstufe,
- Heißluftplastifizierung des Shreddergutes,
- integrierte Trocknung bei der Heißluftplastifizierung.

Beim Recycling der produktgruppenspezifisch verunreinigten Thermoplaste wurden einige der definierten Verunreinigungen eingearbeitet. Die Aufbereitungskosten wurden dadurch gesenkt, das Regranulat kann bei gezielt ausgewählten Anwendungen gegenüber neuen Polymeren eine realistische Marktchance erhalten.

4. PE-Regnanulat eignet sich für alle HDPE-Anwendungen außerhalb der Fasertechnologie und des Lebensmittelsektors, die im Spritzguß hergestellt werden. Es können dies Teile wie Eimer, Bürobbedarf, Möbelapplikationen oder langlebige Packmittel wie Paletten, Displays, Transportkisten sein. Auch Anwendungen im Fahrzeugbau sind denkbar. Die UV-Stabilität, die erhöhte Steifigkeit und der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient des Sekundärmaterials weisen auf die Eignung bei Bauaußenanwendung bzw. für Dach- und Fassadenelemente.

Im Rahmen des optimierten Aufbereitungsverfahrens

wurden auch interessante Möglichkeiten für die Nutzung der separierten Verunreinigungen gefunden.

5. Die höheren Kosten des Bringsystems gegenüber dem Holsystem können durch die Nutzung der Sammelstellenkosten für die getrennte Sammlung möglichst vieler sortenreiner Altstofffraktionen auf die verschiedenen Recyclingwege aufgeteilt und dadurch reduziert werden. Durch Ausrüstung der Sammelstellen mit Vor-Ort-Shreddern bzw. den Einsatz eines mobilen Shredders können die sortenreinen Kunststofffraktionen zerkleinert, das spezifische Gewicht beträchtlich erhöht werden. Die Transportkosten lassen sich dadurch reduzieren.

Nach Aussagen von Prof. Käufer vom Kunststofftechnikum Berlin könne ein wirtschaftliches Verfahren zur Wiederaufbereitung von PE-Kunststoffen bei dem derzeitigen Stand der Maschinenteknik erst oberhalb einer Sammelmenge von 180 Mg pro Jahr erzielt werden.

Verschiedene Gemeinden in den USA signalisierten bereits ihr Interesse an der Übernahme des Berliner Modellversuchs [64].

1990

Oberhausen: Die Firma Continental Lack- und Farbenwerke Gridrich Wilhelm Wiegand und Söhne GmbH entwickelte ein Mehrweg Pfandsystem für Farbeimer, welches am 6. März 1990 in Bonn mit dem 1. Umweltschutzpreis für Industrie ausgezeichnet wurde.

Die bisher benutzten 700.000 Einwegfarbeimer wurden durch 125.000 Mehrwegbehälter, die mit einer Pfandgebühr von 6,- DM belegt wurden, ersetzt. Für die Rücknahme der leeren Farbeimer werden im Großhandel speziell konstruierte Container aufgestellt. Im Werk werden die Mehrwegbehälter zunächst auf Wiederverwertbarkeit geprüft und über eine kombinierte Kälte-/ Wärmebehandlung vorgereinigt. Die Farbreste werden durch mechanische Behandlung vom Behälter getrennt und die mit umweltfreundlichem Leim aufgeklebten Etiketten entfernt. In einer Hochdrucknaßreinigungsanlage werden die Eimer dann desinfiziert und getrocknet. Danach erfolgt eine elektronische Kontrolle, über die defekte Eimer aussortiert und anschließend sofort als Basisstoff zur Herstellung neuer Gebinde granuliert werden können. Intakte Eimer werden gelagert und zur Wiederbefüllung abgerufen. Durch diese Maßnahmen wird erreicht, daß die Wiederverwendung der Farbreste (ca. 600 g/Stck) zu einer Rohstoffeinsparung von etwa 420 Mg/a führt und 450 Mg/a Polyäthylen für die Einwegbehältnisse eingespart werden.

3.3.2 Sammlungen in anderen Ländern

Seit 1970

Funabashi, Japan: Sammlung von Kunststoffen in leichten Kunststoffsäcken. Bei 30.000 Haushalten erfolgt die Abfuhr wöchentlich durch die kommunale Müllabfuhr.

Seit 1972

Lausanne, Schweiz: Getrennte Entsorgung von Glas, Papier und Kunststoffen durch die städtische

Tabelle 3.6 Kunststoffrecycling in den USA für den Zeitraum 1988–2000 untergliedert nach Rohstoffen in 1000 Mg [72]

Kunststoffe	1989	Prognose		φ prognostiziertes Jahreswachstum 89/94 in [%]
		1994	2000	
PET	88,5	363,2	635,6	32,6
HDPE	59,0	354,1	1.384,7	43,1
PVC	6,9	63,6	181,6	56,3
LDPE	4,5	113,5	385,9	90,4
PS	2,3	27,2	68,1	64,4
PP	2,3	18,2	45,4	51,6
Andere	4,5	104,4	431,3	87,2
Gesamt	167,9	1.044,2	3.132,6	44,1

Müllabfuhr bei 80.000 Einwohnern. Es liegen keine Angaben über die Verwertung vor.

Seit 1973

Tokio, Japan: Getrennte Sammlung, Abtrennung der Kunststoffe und Inertstoffe (Glas, Metall, Keramik) zur Entlastung der bestehenden Müllverbrennungsanlagen. 1975 lag der Anteil der getrennt gesammelten Stoffe bei 20 % (davon 19 % Kunststoff).

Die nachfolgenden Angaben stammen aus einem Ergebnisbericht über Produktinnovationen der Firma Werth [151].

1989

Im Rahmen einer Initiative der Firma Solvay zum „europaweiten PVC-Recycling“ wurden zahlreiche Recyclingaktivitäten von PVC-Flaschen in verschiedenen Ländern Europas vorangetrieben:

In **Italien** werden Getränkeflaschen aus PET und PVC in Automaten eingesammelt und zu einem Granulat aufbereitet. Die Identifizierung der beiden Kunststoffarten erfolgt über elektromagnetische Wellen.

In Genf und Lausanne (**Schweiz**) Recycling von PVC-Flaschen in Einkaufsmärkten. Die Flaschen werden mittels Automaten zurückgegeben.

In **Belgien** wird das gewonnene PVC-Recyclat in die Niederlande transportiert, um dort zu Rohren bis zu einem Durchmesser von 630 mm aufgearbeitet zu werden. Die Rohre enthalten eine Mittelschicht aus geschäumtem Recyclat, die etwa 50 % Gewichtsanteil ausmacht. Im Hinblick auf zukünftig umfangreiche Kanalsanierungen in den europäischen Kommunen versprechen die Rohre einen wachsenden Absatzmarkt zu finden. In diesem Zusammenhang wird auch für die Bundesrepublik Deutschland eine wachsende Wirtschaftlichkeit von Alt-PVC prognostiziert.

In **Frankreich** wurde eine wirtschaftliche Interessengemeinschaft für die Verwertung von Getränkeflaschen aus Kunststoff gegründet. Hier fallen jährlich rund 5 Mrd. PVC-Flaschen mit einem Gesamtgewicht von ca. 200.000 Mg/a (1 % des gesamten Haushaltsabfalls) an, der größte Teil des Abfalls wird verbrannt. Frankreich ist damit Europas größter Produzent und Verbraucher dieser Einwegflaschen, hinkt bei den Bemühungen um die getrennte Sammlung und Wiederaufarbeitung hinter seinen europäischen Nachbarn hinterher. 1990 wurden gerade 2.800 Mg PVC einge-

sammelt. Die wirtschaftliche Interessengemeinschaft will die Rückführungsquote in einigen Jahren auf ca. 30 % des Flaschenabfalls steigern. In größerem Umfang werden PVC-Flaschen bisher nur in einigen Gemeinden in der Region Rhone-Alpes im Rahmen des Pilotprojektes „Pelikan“ eingesammelt. Aber auch dort beträgt die Quote nach einer Sensibilisierungskampagne in den Schulen lediglich 20–30 % [72].

1990

Australien: Zur Zeit entstehen mit wachsender Tendenz Kunststoffabfälle von jährlich 1 Mio Mg. Nur etwa 4 % aller Kunststoffabfälle werden derzeit wiederverwertet. In Melbourne/Bundesstaat Victoria ist daher ein Pilotprojekt zur Sammlung unsortierter Kunststoffabfälle aus Haushalten und Industrie angelaufen.

Die mit einer Jahreskapazität von 2.000 Mg betriebene erste Recyclinganlage ist voll ausgelastet. In zwei Melbournen Vororten wurden Sammelstellen eingerichtet, von wo aus die Abfälle zum dort ansässigen Recyclingunternehmen gefahren werden. Das Pilotprojekt wird von der Bevölkerung gut angenommen.

1983

Niederlande/Zoetemeer: In der Aufbereitungsanlage werden u. a. Kunststoffe aus dem angelieferten Müll separiert. Die Kunststofffraktion besteht zu mehr als 90 % aus Polyolefinen und wird vollständig für die Produktion von Regranulat verwendet. Die Fraktion wird zur Zeit noch an Verarbeitungsbetriebe in Lüttich, Belgien, geliefert.

1989

Frankreich/Dunkerque: Im Dezember 1989 startete ein erstes großräumiges Pilotprogramm zur getrennten Erfassung von Aluminium, Glas, Papier, Pappe, Plastikflaschen und Dosen.

1989

USA: Eine Studie des Marktforschungsinstituts Freedonia Group Inc. prognostiziert für den Zeitraum 1989 bis 1994 einen Zuwachs im Verbrauch von Recyclaten von 44 % auf über eine Million Mg. Dies entspricht einer Steigerungsrate, die zehnmal so groß ist wie die des gesamten Kunststoffverbrauchs. Im Jahre 1994 sollen ca. 92 % aus Recyclaten von Verpackungsabfällen stammen. Der entsprechende Anteil für Kunststoffautobilteile soll zum Ende des Jahres bei etwa 16 % liegen.

4. Produkt- und branchenbezogene Sammlung und Verwertung

4.1 Kunststoffe im Automobilbau

Die Entwicklung in der Automobilindustrie war in der Vergangenheit von zwei wesentlichen Zielen geprägt, der Verminderung des Kraftstoffverbrauchs und der Verbesserung der passiven Sicherung. Die erste Zielsetzung ließ sich neben der Entwicklung strömungsoptimierter Fahrzeuge durch Substitution von Metall durch Kunststoff und damit durch Leichtbauweise erreichen. Kunststoffe haben zusätzlich den Vorteil, leicht verformbar und verarbeitbar zu sein. Weitere Gründe für den Einsatz von Kunststoffen im Automobilbau liegen in der Korrosionsbeständigkeit, dem Dämpfungsvermögen, den guten Isoliereigenschaften sowie in den optisch stilistischen Variationsmöglichkeiten.

Diesen positiven Aspekten in der Konstruktion stehen folgende Nachteile gegenüber:

- geringe Energieaufnahme der faserverstärkten Kunststoffe beim Aufprall;
- geringe Oberflächengüte für die nachfolgende Lackierung;
- fehlende zerstörungsfreie Qualitäts-Prüfverfahren.

Insbesondere die Entsorgung der Alt-Autos, die Autowrackbeseitigung bzw. die Verschrottung von Fahrzeugen ist mit erheblichen Nachteilen verbunden.

4.1.1 Aktuelle Situation und Prognosen

Für im Jahr 1988 verkaufte PKWs/Kombis läßt sich ein durchschnittlicher Kunststoffanteil von 116,7 kg = 10,8 % ermitteln. Daran hatte PVC einen Anteil von fast 25 %. 1970 betrug der Kunststoffanteil noch ca. 30 kg.

In der Autoverschrottung ergaben sich für 1988 je Fahrzeug ein Kunststoffanteil von 116,7 kg, das entspricht einem Anteil von 32,8 Gew.-% am Shreddermüll, sowie ein Anteil an Elastomeren (Gummi) von 91,5 kg, entsprechend 25,7 Gew.-%. Beide Werkstoffqualitäten weisen eine Wiederverwertungsquote von 0 % auf [68].

Ein überproportionales Wachstum von Kunststoffanteilen läßt sich bei der Konstruktion neuer Modellreihen beobachten; die Modifikation bestehender Model-

le bewirkt ein entsprechend geringeres Wachstum an Kunststoffmengen.

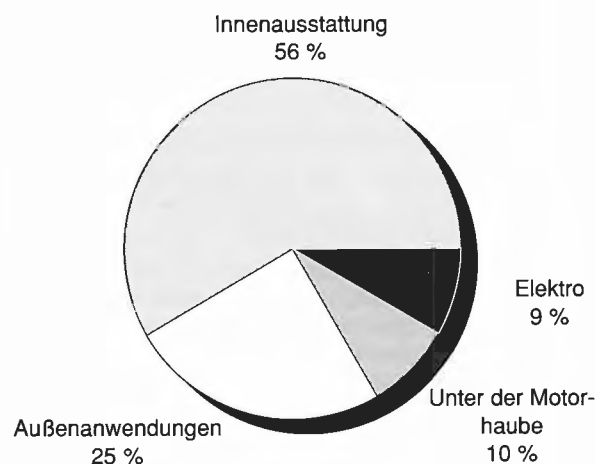
Tabelle 4.1 zeigt den Kunststoffanteil für vier PKW-Klassen im Zeitraum von 1970 bis 1983.

Gemittelt über die vier Fahrzeugtypen ergibt sich für den Zeitraum

	ein Kunststoff-Zuwachs im
1970–75	Automobilbau von 43 %
1975–80	52 %
1980–83	22 %

Zu den Einsatzbereichen von Kunststoffen im Automobilbau siehe Bild 4.1.

Bild 4.1 Kunststoffverbrauch in der europäischen Automobilindustrie

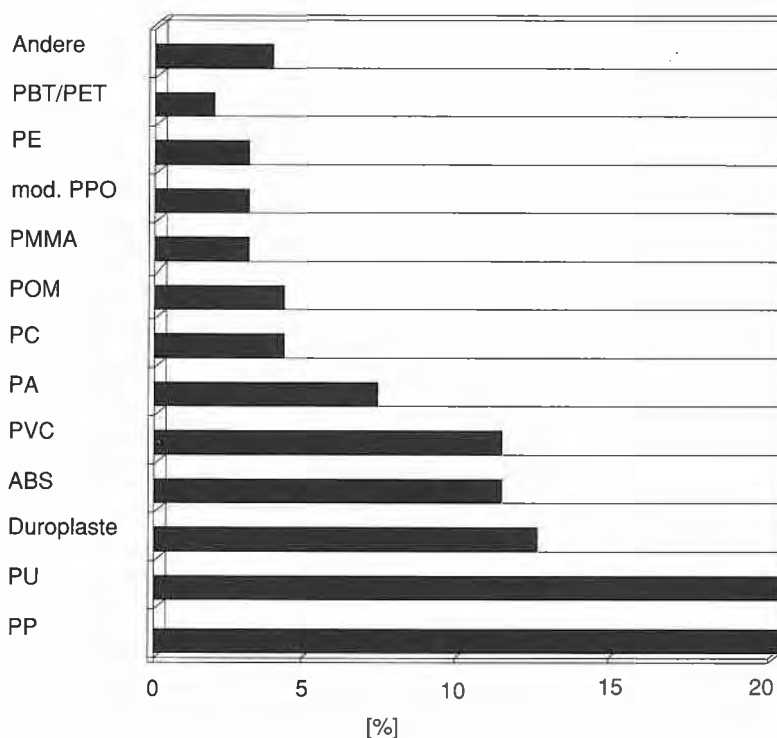


Ca. 90 % der im Automobilbau eingesetzten Kunststoffe werden von sechs Kunststofftypen abgedeckt. Die darüberhinaus vom Hersteller verwandten Kunststoffe wie EPDM, PTFE, PPO, PVB und Sonstige sind entweder mengenmäßig vernachlässigbar oder nicht identifizierbar. Im Bild 4.2 wird der Kunststoffverbrauch im Automobilbau nach Sorten untergliedert dargestellt.

Tabelle 4.1 Kunststoffanteil unterteilt nach vier Fahrzeugtypen für den Zeitraum 1970–1983 [83]

	untere Mittelklasse Kunststoffanteil		Mittelklasse Kunststoffanteil		obere Mittelklasse Kunststoffanteil		Oberklasse Kunststoffanteil	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]
1970	K. A.	–	40	4	44	4	47	3
1975	40	5	68	7	59	5	68	4
1980	76	9	77	8	73	6	115	7
1983	83	12	93	9	116	10	116	7

Bild 4.2 Anteiliger Kunststoffverbrauch nach Sorten untergliedert in der europäischen Automobilindustrie 1988 [72]



Den glasfaserverstärkten Kunststoffen kommt aus zwei Gründen eine besondere Stellung zu:

- sie erschweren die Wiederverwertungstechnologie;
- aufgrund des vorhandenen Substitutionspotentials im Außenbereich des Fahrzeugs wird ein zunehmender Anteil erwartet.

Elastomere, die beim Shreddern im Verbund mit mit anderen Kunststoffen anfallen, haben im betrachteten Zeitraum nur in der Oberklasse einen deutlichen Anstieg gezeigt. Im Durchschnitt lassen sich 28 kg/PKW ($\hat{=}$ 2,7 %) ohne Reifenanteil und ca. 60 kg/PKW ($\hat{=}$ 6 %) incl. Reifenanteil angeben.

Die Entwicklung der Kunststoffnutzung im Automobil weist aufgliedert in Innenraum, Außenbereich und Fahrwerk, Motor und Funktionssysteme folgende Tendenzen auf:

– Innenraum

Es wird kein besonderer Zuwachs erwartet, möglich sind aber Materialveränderungen und der Einsatz sogenannter „soft-touch“-Kunststoffoberflächen, die eine größere Behaglichkeit hervorrufen und dem Kunststoff-Look entgegenwirken sollen. Ein weiterer Ansatzpunkt ist, die Wärmestandfestigkeit der eingesetzten Kunststoffe zu erhöhen. Im „slush-moulding“ wird eine Haut aus Pasten oder PVC-Pulver gesintert bzw. eine PE-Haut im Form des Formstückes erzeugt und im zweiten Verfahrensschritt zusammen mit der Tragkonstruktion hinterschäumt. Diese Slush-Haut weist auch bei höheren Temperaturen keine Spannungsbildung auf. Die gegossene Haut hat eine weiche Oberfläche und bietet stilistische Möglichkeiten.

Daneben wird an der Konstruktion von Trägerteilen aus Kunststoffen gearbeitet; problematisch gestaltet sich z. Zt. noch die Belastbarkeit.

– Außenbereich

Trotz des Schlagwortes „Kunststoffauto“ zeigen die Experten eine eher pessimistische Einstellung. Zum einen bereitet die Bearbeitung in den Lackierstraßen Schwierigkeiten, in denen mit Einbrenntemperaturen von 180 °C gearbeitet wird, so daß die z. Zt. eingesetzten Kunststoffe aufgrund ihrer geringen Temperaturbeständigkeit nicht in einem Arbeitsgang mit den sonstigen Karosserieteilen bearbeitet werden können. Eine separierte Lackierung würde eine Verdopplung des Preises für diese Karosserieteile nachsichziehen. Zum anderen verdeutlichen Crash-Tests, daß große Risiken für die Fahrzeuginsassen bestehen; besonders deutlich gilt dieses für Bauteile aus den Spezialkunststoffen ZMC und SMC, die beim Aufprall splintern und scharfe Kanten bilden. Im Gegensatz zu Blechteilen, die sich verbeulen und verknittern und damit eine hohe Energieaufnahme gewährleisten, nimmt Kunststoff nur in geringem Maße Energie auf.

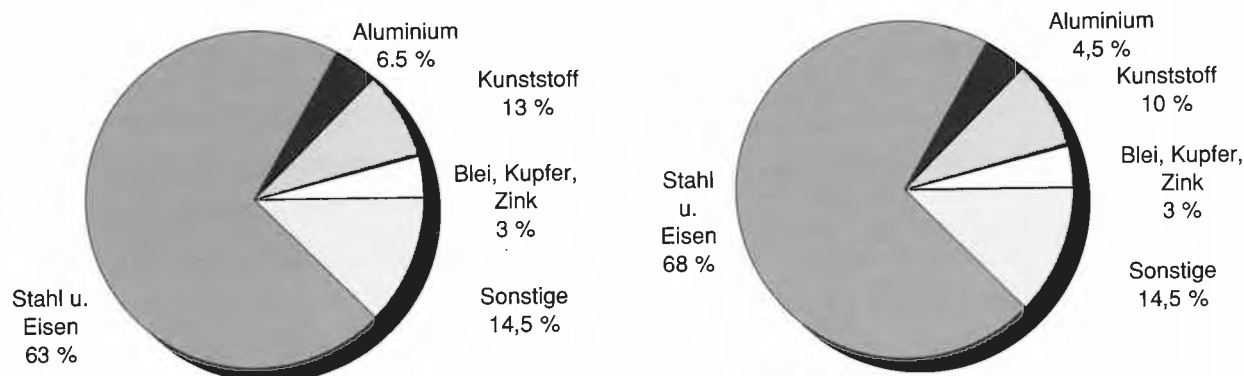
Weitere Schwierigkeiten sind:

- Für die Substitution einzelner Bauteile fehlen z. Zt. noch Montage- und Fügetechniken;
- für Großserien sind nur solche Verfahren geeignet, bei denen die Nacharbeiten so gering wie möglich zu halten sind;
- der ästhetische Eindruck durch die vorhandene Welligkeit der Kunststoffbauteile beeinträchtigt die angestrebte Qualität.

Werden Kunststoffe im Karosseriebau eingesetzt, handelt es sich insbesondere um glasfaser- bzw. glasmattenverstärkte Kunststoffe.

Erweitert man den Prognosezeitraum, so müssen Neuentwicklungen von Fahrzeugen in die Überle-

Bild 4.3 Materialentwicklung im Automobilbau 1985 und 1995 (Prognose) [155]



gung einbezogen werden, die eine Vollkunststoffkarosserie in Verbindung mit einer Rahmenkonstruktion aufweisen (Fiat, Volvo, etc.). Dieses Konzept wurde zwar von allen Experten abgelehnt, aus Wettbewerbsgründen ist es jedoch vorstellbar, daß in den '90er Jahren ein Umdenken bei den befragten Automobilherstellern stattfindet und eine Abkehr von der bisherigen Bauweise mit selbsttragender Karosserie bewirkt wird.

– Motor, Fahrwerk, Funktionssystem

Hier liegen die besten Voraussetzungen für einen vermehrten Kunststoffeinsatz vor, da die Teile technischen Anforderungen genügen müssen und keine zu hohen Qualitätsansprüche an Aussehen bzw. Oberfläche gestellt werden. Als neue Anwendungsbeispiele werden Kunststoffkraftstofftanks, Ölfilter oder Ölwannen gehandelt, wenn die Diffusionsprobleme zufriedenstellend gelöst sind. Die Erfüllung von höheren Umweltschutzanforderungen bereitet zur Zeit noch Probleme. So führt z. B. die verschärfte Gesetzgebung für Geräuschemissionen zum Einsatz von Motorkapselungen und damit wird eine bessere Hochtemperaturbeständigkeit der verwendeten Kunststoffe erforderlich.

Aufgrund der stetigen Zunahme des Kunststoffanteils pro PKW fällt im Jahr 1993 im Vergleich zu 1980 voraussichtlich die nahezu vierfache Kunststoffabfallmenge an. Absolut bedeutet das einen Wert von ca. 250.000 Mg Kunststoffabfall gegenüber 110.000 Mg 1985 und 58.000 Mg aus dem Jahre 1980. Trotzdem wurden allzu optimistische Prognosen für die Zukunft über die Entwicklung des Kunststoffgesamtanteils im PKW aufgrund der o.a. Nachteile bereits zurückgenommen. Bild 4.3 vergleicht die Materialentwicklung im Automobilbau im Jahr 1985 mit der Prognose für das Jahr 1995.

1988 wurden in der Bundesrepublik ca. 1,9 Mio Altfahrzeuge mit einem Durchschnittsalter von 10,6 Jahren endgültig stillgelegt; rund 95 % der Altfahrzeuge werden einem Verwertungsprozeß zugeführt, um Sekundärmaterialien zu gewinnen, ca. 5 % werden exportiert. Z. Zt. werden Bauteile und Werkstoffe demontiert, die einen Gewinn ermöglichen. Dazu gehören Motor, Getriebe, Achsen, Karosserie und Ausstattungsteile, die weiterverwendet werden können. Bauteile mit einem hohen Anteil an teuren Werkstoffen werden zum Wertstoffrecycling ebenfalls ausgebaut.

Hierauf folgt die Verpressung der Autowracks zur Reduzierung des Transportvolumens. Die anschließende Behandlung des Automobils erfolgt in Shredderanlagen, in denen der mechanischen Zerkleinerung die Sortierung und Klassierung folgt. Die Betriebsmittel wie Motorenöl, Benzin und Kühlerflüssigkeit werden in den meisten der z. Zt. ca. 40 Shredderbetrieben in Deutschland vor der Zuführung zum Shredder entfernt. Ca. 60 % des Eingangsmaterials machen Altkarosserien aus, der Rest setzt sich aus Haushaltsgroßgeräten und leichtem Sammelschrott zusammen. Die so gewonnenen wertvollen Stahl- und NE-Metalle, die im Durchschnitt 75 % des Outputs der Shredderanlagen ausmachen, dienen als Sekundärrohstoffe für Stahl- und Umschmelzwerke.

Z. Zt. werden 83 % der Fahrzeuggesamtmenge recycelt; die Shredderreststoffe (ca. 17 %) können aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung (Kunststoff, Glas, Holzfasern, Textilien, Lackresten u. ä.) nicht zusammen verwertet werden. Die organische Fraktion des Shredderabfalls, die überwiegend aus Kunststoffen (ca. 30 %) und Gummi besteht, wird heute ausschließlich auf Hausmülldeponien entsorgt. Die Shredderreststoffmenge belief sich 1988 auf ca. 390.000 Mg [78].

Das äußere Erscheinungsbild des Shredderabfalls weist ölige Flusen mit größeren Stücken, die von Reifen und Schaumstoffen stammen, auf [110].

Heizwert	im Durchschnitt 14 MJ/kg
Schwefelgehalt	0,23–0,36 %
Chlor	1,21–2,65 %
Schüttdichte	230 bis 360 kg/m ³

Die heutige Altfahrzeugentsorgung wird zunehmend durch die folgenden Gründe gefährdet:

- abnehmende Deponiemöglichkeiten;
- steigende Kosten durch Verknappung des Deponieraums und höhere Anforderungen an die Deponietechnik;
- Zunahme der Shredderrückstandsmenge infolge des gestiegenen und weiter zunehmenden Kunststoffeinsatzes im Fahrzeug bei gleichzeitiger Zunahme des Schrottfahrzeugaufkommens;
- rückläufige Erlöse aus dem Verkauf von Shredderschrott infolge der Verwendung von Kunststoffen anstelle von Stahl [115].

4.1.2 Behandlungsmöglichkeiten des Shredderleichtmülls

Ein Weg, der aufgrund der Vielfalt der verwendeten Kunststoffe und der Vermischung mit anderen Werkstoffen propagiert wird, ist die thermische Verwertung. Erste Verbrennungsversuche belegten, daß bei Verwendung der Drehrohrofentechnologie und dem Einsatz notwendiger Entstaubungseinrichtungen und Reinigungsanlagen zur Entfernung von sauren Gasen aus dem Abgas die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft '86 im Reingas eingehalten werden können. Wegen der Schwermetallgehalte im Rohgasstaub ist davon auszugehen, daß die Flugasche nicht ohne weitere Behandlung auf Hausmülldeponien abgelagert werden kann [16].

Eine weitere Möglichkeit des „Energiercyclings“ wird in dem Einsatz von Shredderleichtmüll in einer neu zu planenden Müllverbrennungsanlage gesehen. Dieser Abfall würde 10–20 % der Durchsatzleistung beanspruchen. Die Kosten dieser fiktiven Anlagen werden mit 240,- bis 300,- DM/PKW geschätzt. Somit wäre die Müllverbrennung für die an die Verbrennungsanlage angeschlossenen Einwohner kostenneutral [155].

Das Institut für Umwelttechnologie und Umweltanalytik e. V. propagiert mit Hinweis auf den 25 %igen Anteil von Kunststoffen die thermische Behandlung und gibt unter den denkbaren Pyrolyseverfahren (Zylinder, Drehrohr, Wirbelschicht und weiteren Sonderverfahren) der Wirbelschicht den Vorzug vor der Verbrennung und der Vergasung. Das von ihnen entwickelte Verfahren zeichnet sich durch Rückführung sämtlicher entstehender Ausgangsprodukte in den Reaktionsraum aus, so daß diese weiter reagieren. Angestrebt wird der thermodynamische Gleichgewichtszustand, der bestimmt wird durch Temperatur, Druck und Ausgangszusammensetzung. Z. Zt. wird eine Anlage im Technikumsmaßstab aufgebaut. Aufgrund der Rechenergebnisse wird von einer hohen Ausbeute an Wasserstoff und Methan sowie einer Minimierung der entstehenden Öle und einem Kohlenstoffanteil von 3 Gew.-% ausgegangen. Metalle wie Eisen und Kupfer treten in metallisch reiner Form im Feststoff auf. Der Glührückstand wird bei 50–70 % liegen. Die Gase und Öle stehen als potentielle Wertstoffe zur Verfügung [150].

In der weiteren Diskussion befindet sich die teilweise Substitution von Kohlenstaub durch Shredderleichtmüll im Zementwerk. Selbst wenn aufgrund des Chloranteils die Begrenzung der Wärmebedarfsdeckung auf 10 % beschränkt bleibt, wäre die Entsorgung dieser Abfallfraktion damit gelöst.

Ausgehend von einer benötigten Wärmemenge von 3,6 GJ/Mg erzeugten Zementklinkers und einem Heizwert von 14 GJ/Mg Shreddermüll errechnet sich eine Einsatzmöglichkeit von 26 kg Shreddermüll pro Tonne erzeugten Zements. Bei 300.000 Mg Shredderabfall pro Jahr würde eine 10 %ige Wärmedeckung für 38,5 % der Gesamtzementproduktion ausreichen, um die gesamte Menge zu entsorgen [81].

Chemische Recyclingmöglichkeiten wie Alkoholyse oder Hydrierung lassen z. Zt. keine Bewertung zu, da sich diese Techniken noch in der Entwicklungsphase befinden (siehe Kapitel 7).

4.1.3 Initiativen der Industrie

Die Automobilindustrie hat gemeinsam mit beteiligten Industriebetrieben, mit der Gründung von Arbeitskreisen, der Beauftragung von Studien und der Vorstellung eines Rahmenkonzeptes für die zukünftige Altautoverwertung auf die Problematik in der Shredderindustrie reagiert.

Das Rahmenkonzept für die zukünftige Altautoverwertung, entwickelt von der Automobil-, der Kunststoff- und Stahlindustrie und der deutschen Schrottwirtschaft beinhaltet die folgenden Gesichtspunkte [147]:

- Erweiterung der stofflichen Verwertung der Automobilwerkstoffe durch Schaffung von Wertstoffkreisläufen auch für Kunststoffe, Glas und Elastomere (Gummi). Demontage von Bauteilen aus diesen Wertstoffen, sortenreine Aufbereitung und Wiedereinsatz im Automobilbau, wo technisch möglich und unter den Gesichtspunkten Sicherheit, Energieeinsatz und Wirtschaftlichkeit vertretbar und sinnvoll.
- Erhalt der Deponierbarkeit der durch diese Maßnahmen reduzierten Shredderreststoffmenge auf Hausmülldeponien. Effektive Entfernung der Betriebsstoffe aus dem Altfahrzeug (Trockenlegung) und anschließende Aufarbeitung bzw. umweltgerechte Entsorgung.
- Verwertung der Shredderreststoffmenge durch Rückgewinnung der Energieinhalte und deutliche Volumenreduzierung, sobald entsprechend ausgestattete Anlagen zur Verfügung stehen.

Der Arbeitskreis sieht für die Umsetzung des Rahmenkonzeptes die folgenden Voraussetzungen als notwendig an:

- Aufbau einer Logistik für die Demontage der Bauteile, die Sammlung und den Transport zum Aufbereitungsbetrieb, die unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten betrieben werden kann.
- Der Gesetzgeber autorisiert nur noch Altautoverwerterbetriebe, die die erhöhten Anforderungen in Bezug auf Demontage und Trockenlegung der Altfahrzeuge erfüllen.
- Der Gesetzgeber ermöglicht die Errichtung und den Betrieb von Verbrennungsanlagen nach dem Stand der Technik zur Entsorgung der Shredderabfall-Restmengen in einem Zeitrahmen, der industriellen Planungsabläufen angepaßt ist.

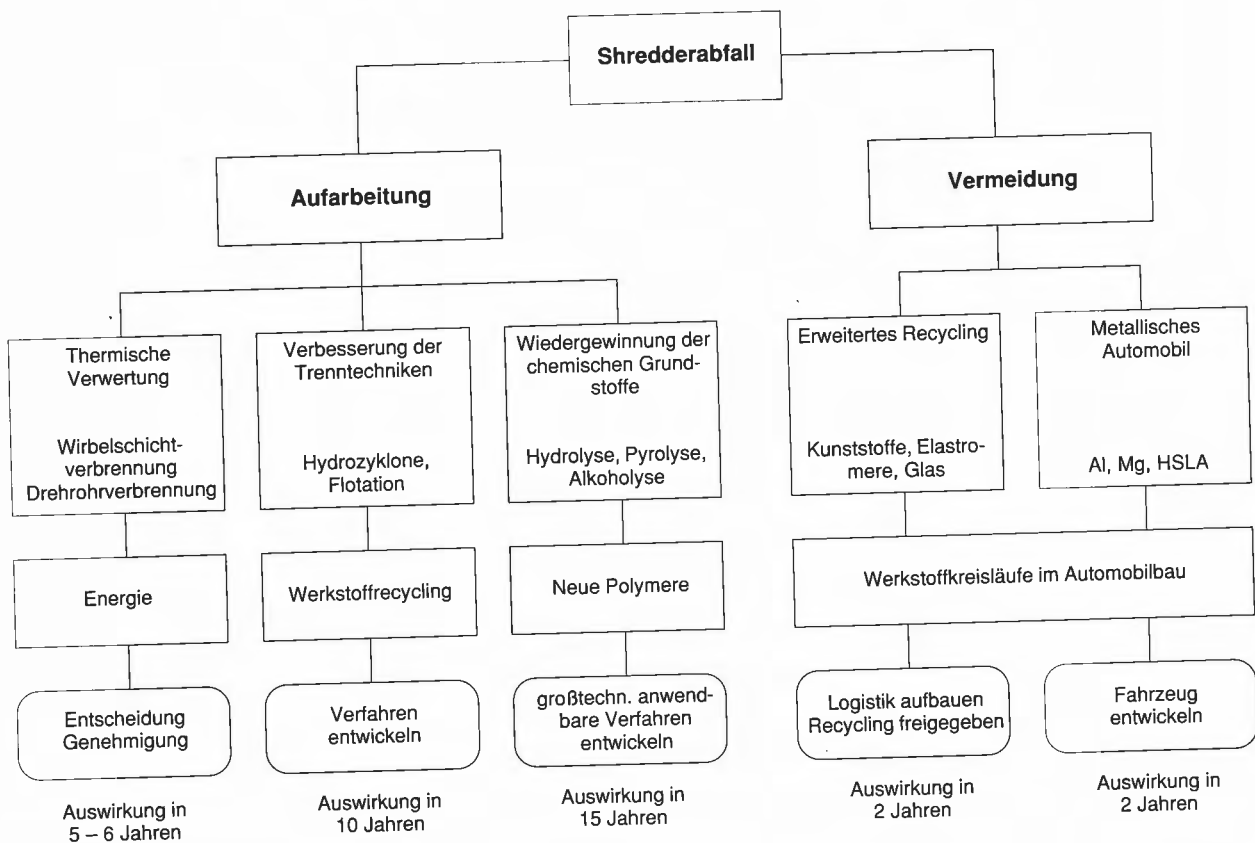
4.1.4 Lösungsansätze zur Verbesserung der Shredderreststoffsituation

Eine Separierung von Kunststoffen erfolgt z. Zt. nur um die Wirtschaftlichkeit der Schrottverwertung zu gewährleisten.

Shredderleichtmüll, bestehend aus Kunststoffen, Glas, Holzfasern, Textilien und Lackresten u. ä., fällt bei der Entsorgung von Autos und sog. „Weißer Ware“ (Kühlschränke, Waschmaschinen, etc.) an.

Kritiker des gezielten Ausbaus von Kunststoffen halten diesen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen für nicht realisierbar. Zu den technischen Aspekten gehören Kennzeichnung, Demontage, Ver-

Bild 4.4 Lösungsansätze zur Verbesserung der Shredderreststoffsituation [155]



bund mit Metallen und Lack, etc. Die wirtschaftlichen Faktoren sind Lohnkosten, die Unverträglichkeit der meisten Kunststoffe untereinander, hohe Demontage-, Sammel-, Lager- und Transportkosten bei nur unvollständiger Erfassbarkeit (Verbundkonstruktion) und damit nur minimale Verringerung des Kunststoffanteils, fehlende Einsatzgebiete für die gewonnenen Materialien sowie ihr niedriger Erlös [28,79].

Voraussetzung für die Ermöglichung einer Demontage ist ein recyclinggerechtes Konstruieren (siehe Kapitel 6.1).

Als Kriterien für die Konstruktionsgestaltung lassen sich nennen [115]:

- Demontage und Redemontagefreundlichkeit;
- Demontage der Kunststoffteile vor Verschrottung der Fahrzeuge;
- Erarbeitung optimierter Demontageanleitungen;
- Zugänglichkeit und Reinigungsmöglichkeiten;
- schnelle Lösbarkeit der einzelnen Bauteile durch Schnappverbindungen, Sollbruchstellen und Spreiznieten, um den Einsatz einfacher Werkzeuge zu ermöglichen;
- Prüf- und Sortiermöglichkeiten;
- Nacharbeitungsmöglichkeiten;
- Kennzeichnung aller Kunststoffe;
- Werkstoffauswahl hinsichtlich Verwertungsverträglichkeit und Korrosionsminimierung;
- ausschließlicher Einsatz von miteinander verträglichen (d. h. mischbaren) Kunststoffen;
- Vermeidung der Kombination unverträglicher Werkstoffe in einer Baugruppierung;

- weitgehende Standardisierung von Elementen und Baugruppen gleicher Funktion, hinsichtlich Werkstoff und Verbindungstechnologie;
- Favorisierung von Thermoplasten vor Duroplasten, geschäumten und verstärkten Thermoplasten und Verbunden;
- Freigabe von Regeneratverwendung in möglichst originären Bauteilen.

Lösungsansätze zur Verbesserung der Shredderreststoffsituation beim Altautorecycling, die sich aufgrund der vorliegenden Forschungsergebnisse ergeben, zeigt Bild 4.4.

4.1.5 Gesetzgebung

Für 1989 ermittelte das Umweltbundesamt einen Gesamtüllanfall in den alten Bundesländern von 250 Mio Mg, davon waren 31 Mio Mg Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sperrmüll, zu denen 500.000 Mg Shredderabfälle zählten. Seit dem 1. 10. 1990 wird Shredder-Leichtmüll als Sonderabfall eingeschätzt.

Die Entsorgung erfolgte bisher durch Deponierung. Durch die neuen gesetzlichen Regelungen wird die unbehandelte Ablagerung der Abfälle nur noch für eine Übergangsfrist von vier Jahren genehmigt sein. Danach müssen Verfahren zur Verfügung stehen, die eine umweltfreundliche Behandlung der Abfälle gewährleisten.

In der TA Sonderabfall wird neben der bevorzugten Zuordnung zu Sondermüllverbrennungsanlagen in

Tabelle 4.2 Zusammensetzung des Trabant [121]

Materialien	Trabant P 601 (Zweitakter)		Trabant T 1.1 (Viertakter)	
	kg	%	kg	%
Walzstahl, ges.	380	61,3	411	58,7
Halbzeuge aus Kupfer	1	0,2	1	0,1
Halbzeuge aus Messing	0,3	0,05	0,7	0,1
Grauguß	12	1,9	55	7,9
GGG	—	—	15	2,1
Temperguß	8	1,3	8	1,1
Aluminium	28	4,5	12	1,7
Blei	8	1,3	3	0,4
Schmiedestücke	18	2,9	6	0,9
Massivumgef. Werkstücke	3	0,5	9	1,3
Farben/Dichtmittel	6	1,0	28	4,0
Klebstoffe	9	1,5	16	2,3
Duroplast	33	5,3		
Stoffe und Kunstleder	16	2,6	10	1,4
PVC für Innenausstattung und Elektrik	10	1,6	10	1,4
PUR aus Sitzen, Lenkrad, Kopfstütze	10	1,6	10	1,4
Pappe (Hartfaserplatten)	10	1,6	10	1,4
Gummi (Reifen)	25	4,0	25	3,6
Elektrik	11	1,8	11	1,6
Glas	29	4,7	29	4,1
Fette, Öle, Kühl- flüssigkeit	3	0,5	5	0,7
Summe	620	100,0	700	100,0

der Präferenzklasse 2 auch die Hausmülldeponie zugelassen. Im Rahmen der Diskussionen zur derzeit auch erarbeiteten TA-Siedlungsabfall ist diese Zuordnung wieder umstritten.

Insbesondere die im Shredder-Leichtmüll gemessenen PCB-Gehalte von 30 bis 100 ppm lassen die Ablagerung auf Hausmülldeponien bedenklich erscheinen. Eine Vereinheitlichung der Entsorgung von Shredderabfällen soll durch eine 3. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, der sog. TA-Shredderrückstände, erfolgen. Für die zukünftige Zulässigkeit der Deponierung ist die Einhaltung stofflicher Grenzwerte (z. B. für PCB, PAK und anderer Kohlenwasserstoffe) von Bedeutung [155].

4.1.6 Entsorgung von Duroplast-Karosserien

Die Stilllegung und Verschrottung der etwa 2,3 Mio [44] Trabant in der ehemaligen DDR ist derzeit in vollem Gange. In den nächsten 5 Jahren wird der größte Teil dieser PKW zu entsorgen sein. Der Trabant stellt ein besonderes Problem dar, da seine Karosserie im Gegensatz zu den meisten anderen PKW aus einem Stahlgerüst mit einer Duroplast-Bepankung besteht.

Die stoffliche Zusammensetzung des Trabant zeigt Tabelle 4.2.

Bei dem Duroplast für die Karosseriebepankung handelt es sich um ein reines Phenolformaldehydharz (PF-Harz), das durch Polykondensation aus Phenol und Formaldehyd erzeugt wird. Es wurde als stückiges und trockenes Harz unter dem Namen Plastaresin 210 vertrieben. Für die Herstellung der Karosserieteile wird Baumwolle mit dem gemahlene Harz gepudert und unter Druck (4-8 MPa) und Erwärmung

(130–180 °C) 6–10 min. in einer Spezialpresse zu Formteilen verpreßt. Nach einer manuellen Nachbehandlung (Schleifen der Kanten) wird das Formteil lackiert. Der Schmelzbereich des PF-Harzes liegt im Bereich von 50–65 °C. Statt Baumwolle können auch andere Trägermaterialien verwendet werden [113,140]. Plastaresin 210 enthält nach Herstellerangaben neben Kohlen-, Wasser- und Sauerstoff max. 3 % organisch gebundenen Stickstoff und max. 0,35 % Magnesium, dagegen keine Halogene oder Schwermetalle [113]. Allerdings können derartige Stoffe im Lack der Karosserieteile enthalten sein.

Unter der Voraussetzung, daß die 2 Mio Trabant in den nächsten 5 Jahren zu 90 % stillgelegt werden, so ergibt sich daraus eine zu entsorgende Duroplastmenge von ca. 12.000 Mg/a. Bei der Behandlung der kompletten Trabantwracks im Shredder fällt dieser Anteil vollständig als Shreddermüll an. Für die Verwertung gibt es bisher verschiedene Vorschläge:

BC Berlin-Consult nahm 1988 auf dem Gelände des VEB Schichtpreßstoffwerkes in Bernau bei Berlin eine Sonderabfallpyrolyseanlage in Betrieb. Dabei werden mit bromhaltigen Flammenschutzmitteln versetzte Leiterplatten unter Luftabschluß bei 650–700 °C entgast. Die Pyrolysegase werden verbrannt. Aus den festen Pyrolyserückständen wird ein an halogenierten Kohlenwasserstoffen armer Mitteltemperaturkoks.

Dieses Verfahren sollte sich nach Auffassung von BC sehr gut auch zur Behandlung der Trabant-Duroplaste eignen. Von besonderem Vorteil ist, daß in den Preßteilen keine Halogene enthalten sind. Bei einem Anlagendurchsatz von 10.000 Mg/a Duropla-

ste rechnet BC mit Kosten von etwa 150 DM/Mg [114].

Beim System der Berliner Fa. GIAB werden die Duroplastteile mit einer Schlagschere grob- und mit einer Pralltellermühle feinzerkleinert. Das Mahlprodukt wird als Zuschlagstoff bei der Neuproduktion von Preßteilen verwendet. Dafür wird neues Bindemittel zugesetzt und die Mischung in einer Formpresse verarbeitet. Bei einer Anlagengröße von 50 kg/h Altduroplast ergeben sich Anlagenkosten von etwa 1 Mio DM und Betriebskosten von 0,25–0,60 DM pro kg zerkleinertes Gut und 7,50–10 DM/kg Neuprodukt.

Alein aus der Trabant-Duroplaste würden bei vollständiger Erfassung nach diesem System 18.000 Mg/a verpreßfähiger Rohstoff erzeugt. Die neuen Duroplaste könnten als Dämmplatten oder in Schallschutzwänden Verwendung finden [43,44].

4.2 Kunststoffe in Verbundverpackungen für Getränke

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich ca. 150.000 bis 160.000 Mg Verbundkartonagen aus der Verpackung von Frischmilch, H-Milch und Fruchtsäften an. Bei einem durchschnittlichen Gehalt von 21 Gew.-% PE sind in diesen Verpackungen ca. 33.000 Mg PE gebunden.

Zur Erfassung der Verbundkartonagen sind prinzipiell Hol- und Bringsysteme möglich:

Bei den Bringsystemen sind folgende Varianten vorstellbar:

- Sortenreine Sammlung in einem separaten Depotcontainer

Die sortenreine Bereitstellung ist Endziel der Sammlung der Verbundkartonagen. Durch die sortenreine Sammlung könnte der Sortieraufwand minimiert werden (Negativsortierung). Demgegenüber stehen jedoch neben Stellplatzproblemen für zusätzliche Container unverhältnismäßig hohe Kosten, vor allem für Behälter, da auf der einen Seite ein engmaschiges Containernetz für akzeptable Erfassungsquoten erforderlich ist, auf der anderen Seite jedoch die einwohnerspezifischen Mengen an Verbundmaterial aus Getränkeverpackungen sehr gering sind.

- Die Erfassung in der Altpapiertonne (System Sack im Behälter)

Für die Erfassung gemeinsam mit Altpapier spricht die flächendeckende Installation der Altpapier-Container, so daß zusätzliche Stellplätze nicht eingerichtet werden müssen. Die Kapazität der Depotcontainer müßte i. a. die geringe zusätzliche Menge an Getränkekartonaten abdecken. Der Verbraucher hat die Altpapiersammlung angenommen und dürfte für die Sammlung gemeinsam mit Papier leicht motivierbar sein, da der Bezug zur Papier/Pappe-Fraktion offensichtlich ist. Altpapier wird im allgemeinen einer Nachsortierung unterzogen, die Sortierstufe für Getränkekartonaten ist technisch realisierbar.

Nachteilig würde sich die Verunreinigung des Altpapiers durch Reste der ursprünglichen Inhalts-

stoffe der Verpackungen auswirken, so daß es von der AP-verarbeitenden Industrie nicht mehr akzeptiert wird. Daher müßte eine Trennung unbedingt erfolgen (System Sack im Behälter).

- Die Erfassung in der Altglastonne

Die gemeinsame Erfassung von Getränkekartonagen im Glascontainer ist aus folgenden Überlegungen heraus von Interesse:

Glascontainer sind ebenfalls flächendeckend in der Bundesrepublik installiert; fast die gesamte Menge des Altglases aus Haushalten wird über dieses System erfaßt.

Die gemeinsame Sammlung von Glas und Getränkekartonaten könnte den Verbrauchern aufgrund des gleichen Inhalts – Getränke – plausibel gemacht werden.

Die Trennung der beiden Fraktionen in einem Sortierschritt müßte aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften prinzipiell ohne Schwierigkeiten machbar sein. Ob die Aussortierung von Hand durch eine technische Sortierstufe ersetzt werden kann, müßte geprüft werden.

Die gegenseitige Verschmutzung der beiden Fraktionen dürfte unproblematisch sein.

Ähnlich wie bei der bereits in Einzelfällen praktizierten gemeinsamen Sammlung von Weißblech und Glas könnte eine Lärmdämpfung beim Einwurf und eine Bruchreduzierung des Glases erreicht werden.

- Die Erfassung im Altdosenbehälter

Für die gemeinsame Erfassung des Getränkekartonagen im Dosenbehälter ergeben sich entsprechende Überlegungen, allerdings werden durch das geringe Schüttgewicht beider Fraktionen, durchschnittlich weniger als 100 kg/m³, hohe Transportkosten verursacht.

- Mehrkammertonne und Mehrkammercontainer
Mehrkammertonnen und Mehrkammercontainer ermöglichen die Erfassung verschiedener Stoffkomponenten mit einem Sammelbehälter und ersetzen an einem Standort mehrere Einstoff-Depotcontainer. Die Einrichtung einer Kammer von handelsüblichen Mehrkammercontainern für die Sammlung von sortenreinem Getränkekartonagen-Material wäre prinzipiell möglich.

- Sammelsystem „Öko-Box“

Das System wurde von Tetra-Pak Österreich entwickelt. Es basiert auf einem faltbaren Karton (Öko-Box), der im Handel für 5 öS angeboten wird.

Nach Herstellerangaben fallen in Österreich ca. 100 Getränkekartonagen pro Person und Jahr (= 2,5 kg/E · a) von Milch- und Fruchtsaftprodukten an.

Der Konsument ist aufgefordert, die anfallenden Getränkekartonagen auszuspülen, flachzudrücken und in den Karton einzufüllen. Die Abmessungen der Box von 23 · 26 · 17 cm ermöglichen die Aufnahme des Jahresanfalls einer Person. Die gefüllte Box wird kostenfrei an einem Postamt abgegeben und an eine Sammelstelle von Tetra-Pak geschickt.

Das Verfahren befindet sich noch in der Entwick-

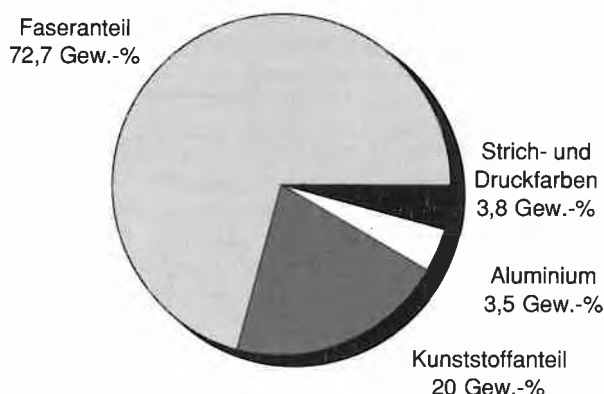
lungsphase; der Einführungszeitpunkt ist derzeit unbekannt.

Untersuchungen haben nach Herstellerangaben eine große Akzeptanz ergeben, die Box zu kaufen, zu befüllen und zur Post zu bringen. Unterstützt wird diese Bereitschaft durch die Teilnahme an einem Gewinnspiel je eingesendeter Box. Geruchsprobleme werden aufgrund von Testergebnissen nach Ausspülen und Falten der Verpackungen nicht erwartet [139].

Bei den Holsystemen kämen die Mehrkomponententonne oder die „Grüne Tonne“ in Frage. Als benutzerfreundliches Erfassungssystem können mit der „Grünen Tonne“ hohe Erfassungsquoten erreicht werden (ca. 70–90 %). Nachteilig ist, daß durch die Vermischung insbesondere die Papierfraktion stark in der Qualität gemindert wird. Die Erfassung von Getränkeverbundkartonagen in der „Grünen Tonne“ kann lose oder im Sack erfolgen.

Im Durchschnitt wiegt ein Verbundkarton 28 g und besteht zu 75 Gew.-% aus Faserstoffen und zu 21 Gew.-% aus Polyethylen, der Rest sind ca. 3,6 Gew.-% Aluminium bei aseptischen Verpackungen und 0,4 Gew.-% Druckfarben. In Bild 4.5 ist die Zusammensetzung dargestellt.

Bild 4.5 Zusammensetzung von Verbundkartonagen für Getränkeverpackungen [128]



Die Gesamtmenge an PE, das für die Beschichtung der Kartons verwendet wird, beträgt ca. 30.000 Mg/a.

Voraussetzung für eine Rückgewinnung des Kunststoffes ist die Auflösung des Verbundes. Dazu kann das zerkleinerte Material in herkömmlichen Stofflösern (Pulper) der Papierindustrie bei Verweilzeiten von 50–60 min gelöst und die anfallenden Fraktionen in verschiedenen Stufen voneinander getrennt werden [131].

Eine weitere Möglichkeit der Auflösung des Verbundes besteht im Einsatz von Hochkonsistenzauflösern (HD-Pulper), die bei einer erhöhten Stoffdichte von ca. 14 % betrieben werden.

Schwierigkeiten bereitet besonders die Trennung des Verbundes von Aluminium und Polyethylen, der auf

Grund der stärkeren Adhäsionskräfte nicht durch einfache Lösungsmechanismen zu trennen ist.

An der FH Aachen wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, dieses Abfallprodukt aus der Papierindustrie aufzuarbeiten und Polyethylen und Aluminium in guter Qualität wiederzugewinnen. Diese Reststoffe enthalten neben Faserrückständen (Zellulose), Polyethylen und Aluminium im Materialverbund. In einem Lösebehälter wird die Verbundfolie mit einem nichttoxischen Lösemittel bei ca. 150 °C behandelt, das in der Lage ist, Polyethylen aufzulösen. Das Aluminium bleibt in Form von kleinen Metallflittern zurück. Die Lösung wird anschließend durch ein Metallsieb abfiltriert. Aluminium bleibt als Rückstand im Sieb, die Polyethylenlösung passiert das Sieb. Im nachfolgenden Verfahrensschritt wird die PE-Lösung auf ca. 80 °C abgekühlt, dabei scheidet sich das Polyethylen fast vollständig in Form eines filtrierbaren weißen Granulates ab. Das Lösungsmittel wird erneut erhitzt und in den Behälter zur Behandlung einer neuen Charge Folienmaterials zurückgeführt.

Die praktische Realisierbarkeit dieses Verfahrens wurde bisher nur im Technikumsmaßstab erprobt. Für die Umsetzung in die Praxis sind weitere Details zu verbessern. Dazu gehören eine verbesserte Abscheideleistung feinsten Aluminiumteilchen, Entfernung von eingeschlüpftem Wasser aus dem Lösemittel und die Rückführung von Lösungsmittel aus der Abluft der Produkttrocknung.

Noch 1991 soll in Zusammenarbeit zwischen der FH Aachen und der RWE Entsorgungs AG eine Versuchsanlage im Pilotmaßstab in Köln-Wesseling errichtet werden [91].

Eine andere Möglichkeit den Verbund zwischen Aluminium und Polyethylen zu lösen, besteht im Einsatz der Tieftemperaturtechnik. Dabei werden die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Materialien ausgenutzt. Viele Stoffe verspröden bei tiefen Temperaturen, d.h. sie zerbrechen ohne plastische Deformation. Die Temperaturabhängigkeit der Kerbschlagzähigkeit ist ein Maß für die Versprödbarkeit. Die Kerbschlagzähigkeit von Aluminium nimmt, im Gegensatz zu der von Thermoplasten, kaum ab. Bei Umgebungstemperatur ist die Kerbschlagzähigkeit von PE sehr hoch, so daß große Mengen an Energie aufgebracht werden müssen, um das Material zu zerstören. Bei Temperaturabsenkung nimmt die Kerbschlagzähigkeit sehr stark ab und nach Erreichen des Glaspunktes erreicht die aufzuwendende Energie ein Minimum. Gleichzeitig wird bei tiefen Temperaturen die Oberflächenadhäsion zwischen Aluminium und PE vermindert. Einen weiteren Einfluß auf die Trennbarkeit hat die unterschiedliche thermische Ausdehnung der Materialien bei tiefen Temperaturen.

Angewandt wurde dieses Verfahren bisher zur Trennung von beschichteten Verschluskkappen für Getränkeflaschen. Vorstellbar ist aber auch ein Einsatz im Bereich der Verbundtrennung für die Reststoffe aus der Faserabtrennung der Papierindustrie [42].

Das überwiegend für die Herstellung von Verbundverpackungen für flüssige Nahrungsmittel zum Einsatz kommende Rohmaterial besteht aus Primärzellstoff.

Die zurückgewonnene, relativ hochwertige Faser kann in den Prozeß der Papierherstellung zurückgeführt werden. Sie eignet sich für die Produktion von:

- grafischen Papieren
- Verpackungspapieren und -pappen
- Hygienepapieren
- Spezialpappen und -papieren.

Der Altpapiereinsatz in der Papier-, Karton- und Pappenproduktion ist durch einen niedrigen Energieeinsatz gekennzeichnet, wenn man die Herstellung von Primärfasern in Rechnung stellt.

Der durchschnittliche Primärenergieaufwand für die Erzeugung und Aufbereitung beträgt für

– gebleichten Holzstoff	ca. 4,3 MWh/Mg
– gebleichten Zellstoff	ca. 3,3 MWh/Mg
– Altpapier	ca. 1,3 MWh/Mg

Das Polyethylen, das nach der Trennung anfällt, kann den verschiedenen Verfahren zur Kunststoffaufbereitung zugeführt werden.

Das durch die beschriebenen Verfahren zurückgewonnene Aluminium kann den Aluminium-Schmelzhütten zum Umschmelzen zugeführt und gemeinsam mit Aluminiumschrott verarbeitet werden. Die Verarbeitung des Altaluminiums erfolgt in den Teilschritten:

- Aufbereiten,
- Schmelzen,
- Raffinieren,
- Legieren und Gießen.

Durch die gemeinsame Verarbeitung des Aluminiums aus Verbundkartonagen mit anderem Al-Schrott kommt es zu Verunreinigungen durch Schwermetalle und Legierungsbestandteilen, die mit Ausnahme von Magnesium edler als Aluminium sind und sich daher bei der Schrottaufbereitung nicht entfernen lassen. Aus diesem Grund werden aus Umschmelzaluminium bevorzugt Gußlegierungen hergestellt, die höhere Konzentrationen und größere Toleranzen der Legierungskomponenten zulassen.

Gehalte an Verunreinigungen, speziell an Wasserstoff und Fremdmetallen wirken sich negativ auf die Festigkeitswerte des Aluminiums aus [25].

Neben der Möglichkeit des Umschmelzens kann das aus den Trennverfahren gewonnene AL-Pulver als Zusatzstoff zu Kunststoffen und Lacken, für Schweißzwecke oder für die Deoxidation von Stahlschmelzen verwendet werden.

4.3 Beispiele für produkt- und branchenbezogene Sammlung und Verwertung

Zunehmend werden kombinierte Sammel-Recycling-Projekte für einzelne Produktgruppen i. d. R. als Pilotprojekte in Gemeinden oder Landkreisen von der Privatwirtschaft ins Leben gerufen. Gerade Hersteller von Kunststoffarten, die in die öffentliche Kritik gerieten, bemühen sich, auf diese Weise Imagepflege zu betreiben. Die nachfolgenden Beispiele stellen eine Auswahl dieser Projekte dar, die nach den marktgängigen Kunststoffarten aufgeführt sind.

PET (Polyethylenterephthalat)

Die Rückführung von sortenreinem Polyester-Verpackungsmaterial steht in den westeuropäischen Ländern noch am Anfang. Dabei ist das PET-Recycling wirtschaftlich hoch interessant. Die günstigen Recyclingmöglichkeiten für PET zeigen sich auch in der hohen Recycling-Rate von 29 % in den USA: ca. 100.000 Mg der insgesamt eingesetzten Menge PET-Material von 350.000 Mg werden recycelt [72].

In der Bundesrepublik wird die Sammlung und Verwertung von Kunststoff-Getränkeflaschen bislang nur punktuell durchgeführt. Nach der Einführung des Getränkepfands für Kunststoff-Einweg-Flaschen hat sich der Einsatz von PET-Mehrwegverpackungen verstärkt. Andere Anbieter setzen auf ein optimiertes stoffliches Recycling, indem sie an dem Aufbau von Rücknahmesystemen arbeiten und nach Recycling-Technologien suchen.

Gebrauchte PET-Mehrweg-Flaschen können im Prinzip wie Glas-Mehrweg-Flaschen gereinigt und neu befüllt werden (Befürworter sprechen von bis zu 60 Wiederbefüllungen gegenüber 25 Umläufen bei Glas, aufgrund der höheren Bruchfestigkeit der PET-Flasche). Die Coca-Cola-Company hat die Reinigung durch eine zusätzliche Kontrolle, den sog. „Schnüffler“ ergänzt. Diese Maschine soll mittels elektrischer Spannung feststellen, ob die Flaschen zwischenzeitlich vom Verbraucher mit Fremdstoffen befüllt wurden, so daß diese aussortiert werden. Ungeklärt ist dabei aber noch das Problem der Migration von Fremdstoffen und Spülmittel in die Wandungen der Flaschen. Ein weiterer Nachteil ist die geringere Gasdichte der PET- im Vergleich zur Glas-Flasche, die dann zum Kohlensäureverlust führt. Ein Sprecher des Bundes für Umwelt und Naturschutz (BUND) hält das Konzept der stofflichen Verwertung für unbefriedigend, da die ausrangierten Flaschen zu minderwertigen Produkten verarbeitet werden. Einen Schritt weiter will die Fa. Wild gehen, die dreischichtige Flaschen mit einer mittleren Schicht aus Recycling- und den äußeren Schichten aus Neu-PET konstruieren will [72].

Die Fa. Coca-Cola-GmbH hat eine Studie über die Umweltbilanzierung ihrer 1,5 l Mehrweg-PET-Flasche in Auftrag gegeben. In einer Gesamtbetrachtung sollen Rohstoffeinsatz, Energiebedarf, Luftbelastung, Wasserbelastung und Abfallvolumen berücksichtigt werden. Die Studie kommt zu dem Schluß, daß die PET-Flasche gegenüber der traditionell eingesetzten Glas-Flasche signifikante Vorteile bietet, die sich auf die folgenden Merkmale gründet [33]:

- hohe Umlaufzahlen;
- durch Erhöhung des Flaschenvolumens von 1 l auf 1,5 l Verbesserung des Verpackungsaufwandes zur Produktmenge;
- Reduktion des Transportgewichtes;
- Möglichkeit der sortenreinen Erfassung von Ausschußmaterial.

Aus verschiedenen Ländern werden Initiativen zum PET-Flaschenrecycling gemeldet. So soll in den Niederlanden PET in einem sogenannten Kaskadenmo-

dell von der zum DSM-Konzern gehörenden Re-tech bv wiederverwertet werden. Das wiedergewonnene Material soll zu Flaschen im Non-Food Sektor, im Elektrobereich und im Automobilbau verarbeitet werden. Die Recycling-Kapazität liegt bei 8.000 Mg/a. Vertragspartner ist die Spa Monopole (Belgien), die ab Mai 1991 ein Produkt in PET-Flaschen anbietet. Die Unternehmen haben ein Sammelsystem in diesem Zusammenhang eingerichtet [97].

Durch die schweizerische Bundesverordnung über Getränkeverpackungen veranlaßt hat der im Juni 1990 gegründete Verein PET-Recycling Schweiz (PRS) ein stoffliches Recycling durch ca. 40 Entsorgungsunternehmen organisiert. Die dem PRS angeschlossenen Unternehmen zahlen seit dem 1. 1. 1991 für jede in den Handel gebrachte PET-Flasche fünf Rappen für die 33 cl-Portionsflasche und zehn Rappen für Flaschen über einem halben Liter. Sammelbehälter stehen sowohl bei Großveranstaltungen als auch bei beim Händler (ohne Pfanderstattung) zur Verfügung. Dort wird ihm ein Miniharras, eine sogenannte Comeback-Box, für fünf Franken angeboten. Die eingesammelten Flaschen werden granuliert und das Granulat zu Flaschen, Tiefziehfolien für Verpackungen, Polyesterfasern für Geotextilien, Teppichen u. ä. verarbeitet [98].

Wellmann International, der größte Kunststoffrecycling Unternehmer, baut zusammen mit der britischen ICI, dem größten europäischen PET-Produzenten, ein umfassendes PET-Recyclingsystem in Europa auf. Die Anlage in Spijk (Niederlande) wird in Kooperation mit der Recyclinganlage von Wellmann in Country (Irland) betrieben. Die Investitionen belaufen sich auf über 2,5 Mio Pfund [72].

Mit der Zustimmung eine neue **Kunststoff-Flasche** anzuwenden, die mit z. T. wiederverwertbaren Material hergestellt ist, hat die US-Nahrungsmittelbehörde erstmals ein derartiges Produkt für die Verpackung von Nahrungsmitteln zugelassen. Mit der Produktion will die Hoechst Celanese demnächst beginnen. Coca-Cola Co. will damit Soft-Drinks vermarkten.

Etwa zeitgleich hat Pepsico Inc. einen Durchbruch beim Recycling von Kunststoff-Flaschen angekündigt, sie stützt sich auf eine Methode des Reifen- und Chemiekonzerns Goodyear Tire and Rubber. In beiden Fällen werden die Polymere der alten Flaschen in ihre Ursprungsmoleküle gespalten [72].

Procter & Gamble sind in der Lage, durch verschiedene Stufen des Recyclingprozesses aus Haushaltsabfall recycelten Kunststoff mindestens zu 25 % in die Herstellung von **Niederdruck-Polyethylen (HDPE)-Flaschen**, wie sie für Haushaltsreinigungsprodukte verwendet werden, einzuschleusen.

Seit Juli 1990 werden 1-l Flaschen eines Weichspülers in verschiedenen europäischen Ländern teilweise aus wiederverwertetem Kunststoff hergestellt. Inwieweit sich diese Verfahrensweise auf andere Produktgruppen ausweiten läßt, soll untersucht werden.

Ein ähnliches Programm wurde von Procter & Gamble bereits in den USA ins Leben gerufen. Dieses be-

steht aus der landesweiten Herstellung von Kunststoffflaschen aus wiederverwertetem Polyester für Haushaltsreiniger. Bisher bestehen i. R. Recyclingkunststoffe in den USA aus unpigmentiertem, hochpolymerem HDPE, der aus Milch- und Saftflaschen zurückgewonnen wird [138].

PVC (Polyvinylchlorid)

Die Deutsche Solvay Werke GmbH hat sich zu Beginn des Jahres 1990 bereit erklärt, PVC-Flaschen zurückzunehmen und aus dem recycelten Material Kanal- und Abwasserrohre zu produzieren. Mit Evian Mineralwasser sind konkrete Kooperationen bereits vereinbart.

In Zusammenarbeit der Deutschen Bundespost Telekom und der Hoechst AG soll ein **Telefonkarten-Recycling** erfolgen. Hierzu rüstet die Telekom die 20.000 bereits bestehenden bargeldlosen Telefonzellen mit Sammelbehältern für die entwerteten Karten nach. Die bis 1995 rund 80.000 neu einzurichtenden Zellen sind bereits mit Sammelbehältern ausgestattet. Telekom liefert die Karten kostenlos an das Hoechst Werk in Gendorf, in dem das Granulat gewonnen wird und stofflich weiterverarbeitet werden soll. Diese Initiative bietet nur einen geringen Beitrag zum PVC-Recycling. Bei einem geschätzten Kartenverkauf von 40 Mio Karten (eine Karte wiegt 5 g) und einen angenommenen 100 %igen Rücklauf ergibt sich für 1994 eine PVC-Menge von 200 Mg. Zum Vergleich: der gesamte PVC-Verbrauch lag 1990 in den alten Bundesländern bei 900.000 Mg [72].

Rund 250 Filialen der Banken und Sparkassen nehmen alte **PVC-Scheckkarten** von ihren Kunden zurück und liefern sie einem Recycling-Unternehmen in Bösel an. Dort werden aus dem gewonnenen Regranulat Abwasserrohre, Blumenkübel, Plastik-Bänke und Bauprofile hergestellt [107].

Blisterverpackungen sind ein wirksames Instrument des Handels, Produkte verkaufsgünstig zu präsentieren. Ein technisches Konzept, um Umverpackungen noch im Supermarkt zu entsorgen, hat die Hoechst AG in Zusammenarbeit mit IBM entwickelt. Ein direkt am Verkaufsort aufgestelltes Zerkleinerungsaggregat reduziert das Volumen der Kunststoff-Verpackungen und verringert damit den Raumbedarf des Handels für die Erfüllung seiner Rücknahmepflicht. Die Hoechst AG garantiert die Rücknahme der zerkleinerten PVC-Abfälle aus Blisterverpackungen. Die Aktion läuft unter dem Namen „**Rent a blister**“ [3].

Die Hoechst AG entwickelte für die sortenreine Gewinnung von PVC aus Hausmüll den **EAN-Code**. Dieser Strich-Code wird vom Verpackungshersteller mit Daten über die Art des verwendeten Kunststoffs versehen. Diese Information wird vom im Verkaufsraum befindlichen Gerät gelesen und trennt die eingeworfenen Verpackungen nach PVC und anderen Werkstoffen. Die herausgefilterten PVC-Abfälle werden sofort zerkleinert und einer weiteren Bearbeitung zugeführt. Die anderen Verpackungen fließen in einen Sammelbehälter für gemischte Kunststoffe, sofern nicht weitere Entsorgungssysteme bestehen [3].

Im Dezember 1990 wurde in Großefehn eine Anlage für die Wiederaufbereitung gebrauchter **PVC-Fußböden** eingeweiht, in der Fußbodenbeläge aus Sammelgebieten in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz recycelt werden. Träger des Großprojektes ist die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag-Recycling, in der rund 20 internationale PVC-Rohstoff- und Bodenbelaghersteller zusammengeschlossen sind. Bei einer geschätzten Rücklaufmenge von 6.000 Mg gebrauchten Fußbodenbelag soll das Projekt das Stadium der Wirtschaftlichkeit erreichen, angestrebt ist dieses in drei Jahren. Das Einzugsgebiet umfaßt ca. 10 Mio Einwohner. Container werden in Baumärkten und im Großhandel für ausgediente PVC-Fußbodenbeläge aufgestellt. Die PVC-Rohstoff- und Bodenbelaghersteller garantieren Abnahme und Wiederverwertung aller aufbereiteten Mengen [72].

In Frankreich wurde von Produzenten von PVC-Verpackungen und Mineralwasser eine wirtschaftliche Interessengemeinschaft für die Verwertung von Getränkeflaschen aus PVC gegründet. Diese Unternehmen verpflichten sich, von Gemeinden gebrauchte **PVC-Flaschen** zum Preis von 1.350 FF/Mg zurückzunehmen. Ein weiteres Ziel ist das Auffinden neuer Technologien für die Wiederaufbereitung sowie Absatzmärkte für die Recyclate zu finden (vgl. Kapitel 3.3.2) [72].

Die Stadt Erlangen hat im Mai 1990 mit der Rehau AG + Co. vereinbart, im Rahmen eines einjährigen Pilotprojektes ausgediente **Kunststoffrohre und -fenster** zu entsorgen. Die Kunststoffe sollen im überwiegenden Maße in den eigenen Werken aufbereitet und dem Produktionskreislauf wieder zugeführt werden. Während sich die Stadt Erlangen eine Entlastung der Mülldeponien erhofft, will die Rehau AG Erfahrungen mit dem systematischen Recycling von Kunststoffabfällen in größeren Mengen sammeln [72].

PS (Polystyrol) / Polypropylen

Die Coronet Kunststoffwerk GmbH, mit einer Tagesproduktion von 900.000 Bügeln, stellt dem Handel einen wiederverwertbaren Behälter zur Verfügung, in dem gebrauchte **Polystyrol-Bügel** gesammelt und ins Werk zurückgebracht werden, wo sie sortiert und anschließend einem aufwendigen Verfahren unterzogen werden, um neue Bügel zu fertigen [72].

Die Fa. Müller Milch, die über eine Kunststoffverarbeitung verfügt, startete im Herbst 1989 einen Versuch im Landkreis Aichach-Friedberg Joghurt-Becher im Bringsystem zu sammeln und anschließend zu recyceln. Im März des folgenden Jahres wurden in München zunächst 2 Sammelstellen eingerichtet, an denen auch **Joghurtbecher aus Polystyrol und Polypropylen** anderer Unternehmen abgegeben werden konnten. Aus diesen beiden Materialien bestehen 95 % aller Kunststoff-Joghurt-Becher. Das Netz von Sammelstellen wurde vorerst auf 40 Stellen verdichtet. Inzwischen wurde das Projekt auch auf andere Städte ausgedehnt. Die Verbraucher werden aufgefordert, die Becher mit Wasser auszuspülen, die Dekelfolie restlos zu entfernen und mit der Öffnung nach oben einzuwerfen. Die Sortierkosten betragen mehr

als ein Drittel der Kosten, die für das Recycling aufgewandt werden müssen. Die manuelle Sortierung ist erforderlich, da Verunreinigungen zu ca. 5 % vorhanden sind. Nach dem Waschvorgang und dem Mahlen erfolgt die Trennung von PP und PS im Hydrozyklon. Die sortenreinen Kunststoffe werden bei 240 °C geschmolzen und am Aluminium-Abscheider von Alu-Resten getrennt. Das abgekühlte graue Granulat wird für die lichtschützende und stützende Mittelschicht der Joghurtbecher verwandt, die damit bis zu 60 % aus Recyclingmaterial hergestellt werden können [51,80,132].

PE (Polyethylen)

Rund 3.000 bis 5.000 Mg **PE-Öldosen** werden jährlich deponiert oder in Sonderanlagen deponiert. Aus gebrauchten Ölgebinden in Größen von 0,25 l bis 5 l läßt nach einer CKW- und FCKW-freien Reinigungsphase ein Recycling-PE gewinnen, daß in der durch Mehrschicht-Coextrusion hergestellten Dosenwand im Innern einen Anteil von 70 % hat. Ca. 15 % werden zur Herstellung von Außen- und Innenwand verwandt. Die Eigenschaften sollen denen neuer PE-Öldosen entsprechen. Grundvoraussetzung ist ein sortenreines Erfassen der Stoffe, das die Kennzeichnung der Dosen bedingt. Nur so lassen sich eine gezielte Sammlung und Sortierung am Anfallort gewährleisten. Bereits am Sammelort wird eine visuelle Kontrolle vorgenommen, um zu verhindern, daß andere Abfälle auf diesem Weg illegal entsorgt werden. Zur weiteren Sicherung der Qualität setzt die Fa. Kuehmichel Metall- und Glasdedektoren ein. Das in den gebrauchten Dosen verbliebene Öl – teilweise bis zu 5 % der Restmenge – läßt sich durch die Einschaltung einer im Reinigungssystem integrierten Konditionierzone zurückgewinnen. Das Konzept soll die Mineralölkonzerne im gesamten Bundesgebiet ansprechen. Eine Umstellung auf das Kuefa-System könnte 1991/1992 erfolgen. Der geschlossene branchenspezifische Kreislauf verhindert, daß Ölgebinde-Leergut zu Lebensmittel-PE-Verpackungen recycelt werden [99].

Die Deutsche Bundespost verzichtet auf das in ihren Lieferbedingungen bislang enthaltene Verbot, für Kabelschutzrohre Regranulate einzusetzen. Es ist den Kunststoffherstellern jetzt gestattet, recyceltes Material für die Herstellung von PE-Rohren zu verwenden. Allerdings sind die Qualitätsanforderungen noch zu hoch und lassen sich nur von Produkten aus Neuware erfüllen [100].

EPS (Styropor)

In der Bundesrepublik werden jährlich rund 120.000 Mg **Styroporschäumstoffe** hergestellt. 85.000 Mg dienen als Dämmstoffe im Baubereich, 30.000 Mg werden als kurzlebige Verpackungen verwandt. Neben der Entsorgung von ca. 100 Unternehmen und 150 Sammelstellen, die einen Rücklauf von ca. 18 % der Neuproduktion erreicht, bietet das Storopack-Werk Langenau seit Oktober 1990 ein Einzelentsorgungskonzept über den Handel an. Danach kann jeder interessierte Händler oder Gewerbebetrieb von Recyclingsäcken, die ca. 15–20 Großpackungen

fassen, gegen eine Gebühr von 30,- DM entsorgt werden, 1991/92 soll die Recyclingquote 50 % erreichen. Das Regranulat wird an Unternehmen verkauft, die Spritzgußteile herstellen.

Sonstige

Die Fresenius AG verarbeitet jedes Jahr ca. 1.300 Mg Polyethylen und Polypropylen zu Infusionsflaschen, medizinischen Beuteln und Kanistern für Dialyse-Lösungen. Von den rund 1 Mio Mg **Krankenhausabfällen** haben die Kunststoffe einen Anteil von 20 %. In einem Feldversuch werden aus Kliniken und Dialyse-Zentren Kunststoffabfälle zurückgenommen und einem Recycling zugeführt. Gegenwärtig (01/1991) sammelt man 20 Mg/Monat. Die Rücklaufquote liegt bei 80 %. Die Rückführung erfolgt über die gleichen Schienen, der sich die Auslieferung bedient. Mit im Einzugsgebiet angesiedelten Recyclern sind Verträge geschlossen worden, die sowohl die Annahme sichern als auch die Regulierung der Preise nach Rückgabemenge und Marktgeschehen festlegen. An den Kosten beteiligen sich die Krankenhäuser und die Fresenius AG. Während die Krankenhäuser aufgrund der gestiegenen Entsorgungskosten Ausgaben einsparen, zahlt das Unternehmen im Moment wegen

des Überangebotes an Recyclingmaterialien zu [72]. In der ersten Jahreshälfte 1990 starteten eine Reihe von **Supermärkten in den USA** mit der Sammlung von sauberen und trocknen Tragetaschen, die anschließend einem sortenreinem Recycling zugeführt werden. Einer der großen Recycler auf diesem Gebiet im Staat New York ist Mobil Chemical. Ein Recyclingverbund will in den USA bis zum Jahr 1994 200 Mio lbs PET und HDPE pro Jahr recyceln und zu Regranulat verarbeiten.

In der Bundesrepublik Deutschland fallen jährlich über 30 Mio Gebinde-Eimer aus Kunststoff an. Die Firma Contilack führte 1990 einen Pfandwerteimer (Eimer Pfand 5,-DM, Deckel Pfand 1,-DM) ein, den sie bei den Großhändlern einsammelt und ins Werk transportiert. Nach einer weitgehend automatisierten Reinigung und einer Überprüfung auf Unversehrtheit wird der Eimer dem Produktionskreislauf wieder zugeführt. Defekte Eimer werden zur Neuproduktion verwendet. Farbreste werden über ein Trennverfahren wiedergewonnen und der Herstellung zugeführt. Diese Initiative wurde vom Bundesverband der Deutschen Industrie mit dem Umweltschutzpreis in der Gruppe „Umweltverträgliche Produkte“ ausgezeichnet [72].

5. Grundlagen und Probleme

5.1 Einfluß von Verunreinigungen auf die Wiederverwertung

Die auftretenden Verunreinigungen lassen sich je nach Herkunft in drei Gruppen einteilen:

- Verunreinigungen, hervorgerufen durch Kontakt mit anderen Müllbestandteilen;
- Verschmutzungen, die von der Verwendung des Produktes herrühren;
- andere Materialien, die als Fehlstoffe eingetragen werden, z. B. Papier.

Die äußere Verschmutzung durch fremde Müllbestandteile ist bei der konventionellen Ein-Gefäß-Sammlung am höchsten. Der Verschmutzungsgrad liegt nach Untersuchungen bei ca. 5 % [129]. Durch eine Trennung der Müllbestandteile vor der Sammlung, können diese Verschmutzungen weitgehend vermieden werden.

Die von der Produktnutzung stammenden Verunreinigungen bestehen im wesentlichen aus Etiketten, Metallverschlüssen und Resten des Inhaltsstoffes. Durch das geringe Gewicht des Kunststoffes bei Verpackungen im Vergleich zum Füllgut bedeuten selbst Reste von 1 % der ursprünglichen Füllmenge einen Massenanteil an Verunreinigungen zwischen 10 % und 35 %. Bei höheren Restinhalten in Lebensmittelverpackungen (z. B. halbgefüllte Margarinebecher) kann der Anteil der Verunreinigung das 10- bis 30fache des Verpackungsgewichts erreichen. Die Tabelle 5.1 zeigt mittlere Verschmutzungsgrade für drei typische Haushaltsverpackungen. Diese liegen zwischen 28 und 60 % des Verpackungsgewichts. Die aufgeführten Inhaltsstoffe sind stark wasserhaltig. Nach einer ohnehin notwendigen Trocknung reduziert sich die verbleibende Verunreinigung entsprechend auf ca. 5–15 %. Hinzuzurechnen sind eventuelle Produktaufkleber oder Deckelfolien aus Aluminium.

Der Anteil der unerwünschten Stoffe in der Kunststofffraktion ist stark abhängig vom Sammelsystem. Beim System „Grüne Tonne“ verbleibt nach der Auftrennung des Wertstoffgemisches in einzelne Wertstoffarten ein Teil des Papiers in der Kunststofffraktion. Werden Kunststoffe als Einzelstoffe gesammelt, muß

speziell bei Sammelcontainern mit großen Einwurföffnungen in Einzelfällen mit einem Mißbrauch zur Abfallentsorgung gerechnet werden (Einwurf von Mülltüten). Fremdstoffe, die aus Unkenntnis des Verbrauchers in der Kunststofffraktion enthalten sind, betragen bis zu 5 %. Es sind dies vor allem Metallfolien und beschichtete Papiere. In Hamburg-Bergedorf wurden in Containern des Bringsystems Verunreinigungen zwischen 5 und 12 % (ohne anhaftende Verschmutzungen) gefunden [56].

Für eine Wiederverwertung von Kunststoffabfällen aus Haushalten, die auf die Gewinnung hochwertiger Produkte durch eine Artentrennung abzielt, ist daher eine intensive Reinigung und Abtrennung der Fremdstoffe erforderlich. Anhaftende Reststoffe sind in der Regel mit Wasser abtrennbar. Übrige Fremdbestandteile müssen durch Ausnutzung und gezielte Beeinflussung unterschiedlicher Materialeigenschaften separiert werden (z. B. Dichte, Stückigkeit, elektrische Leitfähigkeit).

Im Rahmen der Berliner Kunststoff-Recycling-Tests wurden die Einflüsse von produktspezifischen Verunreinigungen auf das stoffliche Recycling der Kunststoffverpackungen untersucht. In Versuchsreihen zur Optimierung der Aufbereitungsverfahren wurden die Verunreinigungen von Waschmittelflaschen und Farbeimern aus HDPE, sowie Speiseölfaschen aus PET bestimmt, und deren mögliche Einarbeitung in das Recyclat untersucht. In Tabelle 5.2 werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Bild 5.1 zeigt die Zusammensetzung der Verpackungen für Flüssigwaschmittel, Dispersionsfarben und Speiseöle.

5.2 Einfluß von Kunststoffmischungen auf die Wiederverwertung

Mischungen von verschiedenen Kunststoffarten verschlechtern die Qualität der daraus hergestellten Produkte zum Teil erheblich. Die in Tabelle 5.3 angegebenen Unverträglichkeiten beziehen sich auf Qualitätsstandards, die für Neuware gelten. Die vier am häufigsten im Hausmüll vorkommenden Kunststoffe (PE, PP, PS, PVC) sind untereinander völlig unverträglich. Dies verhindert den Einsatz von gemischten Kunststoffabfällen für hochwertige Produkte.

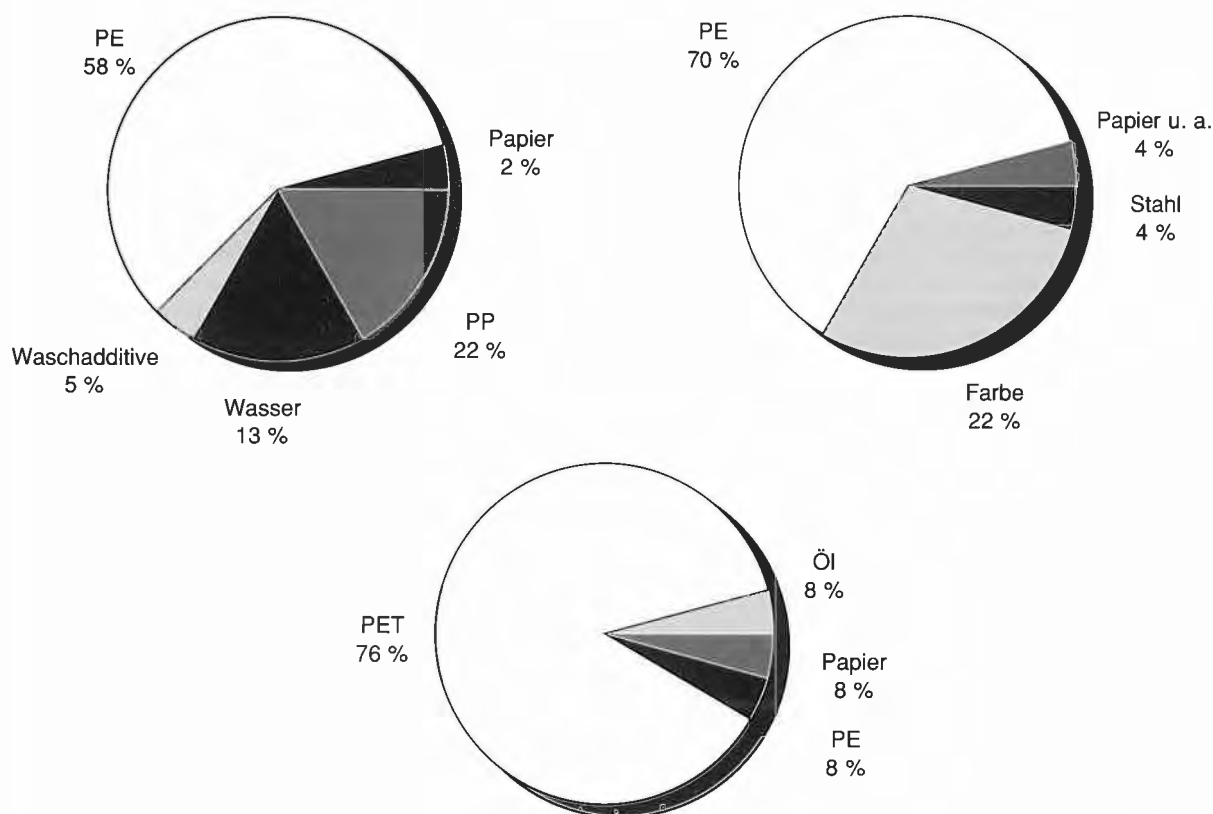
Darüberhinaus müssen unterschiedliche Materialeigenschaften innerhalb einer einzelnen Kunststoffart berücksichtigt werden, wie z. B. der Schmelzindex für LDPE (Tabelle 5.4). Die Dichte der aufgeführten Folientypen schwankt innerhalb enger Grenzen von 0,5 %, während sich der Schmelzindex unabhängig von der Dichte auf Werte zwischen 0,2 und 4,6 g/10 min einstellen läßt (vgl. Kapitel 4.2).

Müssen Produkte aus Sekundärkunststoffen nur geringen Ansprüchen genügen, so können auch Mischungen der drei Hauptfraktionen (PE/PP, PS, PVC)

Tabelle 5.1 Verschmutzung durch Restinhalte ausgewählter Haushaltsverpackungen [129]

Parameter	Einheit	Quark-becher	Joghurt-becher	Spül-mittel
Füllinhalt	g	500	150	500
Restinhalt	g	4,5	5	18
Restanteil	Gew.-%	0,9	3,3	3,3
Leeergewicht	g	9	3,3	47
Verschmutzung	Gew.-%	33	60	28

Bild 5.1 Stoffliche Zusammensetzung entleerter Verpackungen für Flüssigwaschmittel, Dispersionsfarben und Speiseöle [65]



verarbeitet werden. Durch Zugabe von angepaßten grenzflächenaktiven Substanzen kann die Verträglichkeit zwischen PS/PE, PS/PVC, PE/PVC unter bestimmten Bedingungen erhöht werden. In vielen Fällen wird sich jedoch die Verwertung auf die PE/PP-Fraktion mit einem Anteil von 60–70 % an den Kunststoffen beschränken, um qualitativ bessere Produkte herzustellen.

Die Sortentrennung von Kunststoffabfällen ist nicht nur technisch aufwendig und teuer, in einigen Fällen

wie z. B. bei Verbundstoffen sogar unmöglich. Verbundstoffe werden nach der sog. Sandwich-Technik aufgebaut, bei der eine Schicht aus mehreren Lagen verschiedener Kunststoffe besteht. Ein mehrschichtiger Aufbau ist bei Kunststofffolien bereits seit einigen Jahren Stand der Technik und wird seit kurzem auch für Hohlkörper (Bild 5.2) angewandt [111]. Dabei werden bis zu sechs Schichten aus unterschiedlichen Kunststoffen koextrudiert. Diese bestehen aus so unterschiedlichen Arten wie PE, PP, PC (Polycarbonat), PA oder PAN (Polyacrylnitril). Angewandt wird die Ko-

Tabelle 5.2 Mögliche Einarbeitung produktspezifischer Verunreinigungen

Sortenreine Kunststoffverpackungen	Einarbeiten produktspezifischer Verunreinigungen		
	möglich	bedingt möglich	nicht möglich
Waschmittel-Weichspülverpackung aus NDPE	Waschadditive	PP-Anteil	Papier, Wasser
Dispersionsfarbeimer aus HDPE		Dispersionsreste bis zu 20 Gew.-%, feine Partikel LO, 1 mm	
Speiseölfflaschen aus PET			Öl, Wasser

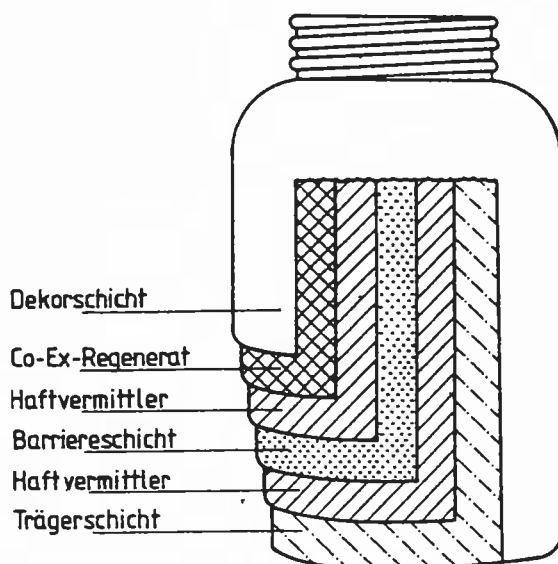
	Polystyrol	Styrol-Acrylnitril-Copolymer	ABS	Polyamid	Polycarbonat	Polymethylmethacrylat	Polyvinylchlorid	Polypropylen	Polystyrol
Polystyrol	–								
Styrol-Acrylnitril-Copolymer	6	–							
ABS	6	1	–						
Polyamid	4–5	6	6	–					
Polycarbonat	5–6	2	2	6	–				
Polymethylmethacrylat	4	1	1	6	1	–			
Polyvinylchlorid	6	2	3	6	5	1	–		
Polypropylen	6	6	6	6	6	6	6	–	

Tabelle 5.3 Unverträglichkeit verschiedener Kunststoffarten [129]
(1 = sehr gute Mischbarkeit, 6 = Unverträglichkeit)

Tabelle 5.4 Schmelzindizes von verschiedenen LDPE-Folientypen [129]

Typ	Dichte [g/m ³]	Schmelzindex [g/10 min]
1	0,917 – 0,920	1,3 – 1,8
2	0,917 – 0,920	0,2 – 0,3
3	0,923 – 0,925	0,6 – 0,9
4	0,923 – 0,926	1,7 – 2,2
5	0,923 – 0,926	3,4 – 4,6
6	0,926 – 0,929	0,2 – 0,3
7	0,926 – 0,929	1,7 – 2,2
8	0,926 – 0,929	3,4 – 4,6

Bild 5.2 Struktur eines 6-schichtig koextrudierten Hohlkörpers [111]



extrusion, um die Parameter Migration, Permeation und Oberflächenhärte zu verbessern. Ein innerbetriebliches Recycling ist hierbei durch die Verwendung der Produktionsabfälle in einer der mittleren Schichten gewährleistet.

Möglicherweise bietet dieses Vorgehen einen Ansatz dafür, auch unsortierte Abfälle zur Herstellung hochwertiger Produkte zu verwenden, wenngleich der Anteil des Recyclates im fertigen Produkt verhältnismäßig gering ist.

5.3 Kunststoffe in Verbundprodukten und deren Wiederverwertung

Kunststoffe werden für eine Vielzahl von Einsatzbereichen mit anderen Werkstoffen verbunden. Diese Verbunde haben dann vorteilhafte Eigenschaften, welche von den Einzelwerkstoffen nicht erreicht werden. Der Verbund ist so innig, daß eine einfache Separierung beim Recycling nicht ohne weiteres möglich ist. Beispiele für solche Verbundprodukte sind:

- Verbundverpackungen für Lebensmittel:
 - PE-Beschichtung, Karton, Druckfarben,
 - PE-Beschichtungen und -filme, Aluminium-Folie, Karton,
 - zusätzlich LDPE-Beschichtung, -kaschierung, Primer, PE-Copolymer-Beschichtung, Hart-PVC-Folie, PVDC-Beschichtung, Kaltkleber, Überdrucklack, Chromokarton,
- Verpackungsfolien mit Gasbarriere: PVC koextrudiert mit PVDC,
- Hohlkörper mit Gasbarriere: PVC-Hohlkörper beschichtet mit PVDC,
- Fußbodenbeläge: Weich-PVC auf Glasvlies,
- Kunstleder: Kompaktschicht auf Schaumschicht,
- Planen: Weich-PVC auf Polyestergerewebe,
- Tapeten: Weich-PVC auf Papier,
- mit braunen Folien vergütete PVC-Fensterprofile,
- Elektrokabel.

Die stoffliche Verwertung – insbesondere der Verbundverpackungen für Lebensmittel und andere Produkte des täglichen Bedarfs mit Papier und Karton als Trägermaterial – wird bislang von wenigen Unternehmen großtechnisch betrieben. Die Trennung der Verbundmaterialien stellt hohe Anforderungen an die Aufbereitungstechnik und ist mit Sortierung allein nicht zu erreichen. Am weitesten ist die Verwertung von Verbundkartonagen für flüssige Nahrungsmittel vorangeschritten:

- Die Rückgewinnung der Fasern wird von einigen Papierfabriken über Spezialrührgeräte erreicht.
- Der Restverbund aus PE und Aluminium kann über ein Verfahren der RWTH Aachen getrennt werden, bei dem über ein organisches, nichttoxisches Lösungsmittel der Kunststoff in Essig gebracht und separat wiedergewonnen wird.
- Nach einem Verfahren, das unter Federführung des Verpackungsherstellers Tetrapak erarbeitet wurde, werden die geshredderten Verbundmaterialien zu Platten gepreßt, die für Dämmplatten oder Möbel verwendet werden können.

Für die stoffliche Verwertung anderer Verbundprodukte liegen einige Erfahrungen vor. Diese Abfälle können in speziellen Schneid- und Mahlanlagen zerkleinert und anschließend, gegebenenfalls durch „Aufcompoundieren“ (PVC, Weichmacher), zu verarbeitungsfähigen Formmassen aufbereitet werden. Auf diese Weise können Recyclat-Produkte wie Matten, Unterschichten für Fußbodenbeläge, Schuhsohlen, Schläuche, etc. hergestellt werden [19,26].

5.4 Additive in Kunststoffen und deren Auswirkung auf das Recycling

Die bei der Herstellung von Kunststoffherzeugnissen vielfach verwendeten Additive werden nach den entsprechenden Einsatzgebieten in Prozeß- und Funktionsadditive unterschieden. Während Hilfsstoffe zur Einstellung des Verarbeitungs- und Gebrauchsverhaltens in verhältnismäßig kleinen Mengen bis ca. 5 % zugegeben werden, kann der Anteil an Weichmachern, Füllstoffen und Verstärkern bis zu 70 % am Kunststoff betragen.

Die Prozeßadditive werden direkt bei der Herstellung bzw. Verarbeitung der einzelnen Kunststoffe benötigt. Dabei wird unterschieden in:

- Verarbeitungsstabilisatoren,
- Verarbeitungshilfsmittel.

Verarbeitungsstabilisatoren erfüllen folgende Funktionen:

- Verhinderung der vorzeitigen Polymerisation der Monomere,
- Verhinderung der thermischen Zersetzung oder des oxidativen Abbaus bei der Verarbeitung von Thermoplasten.

Als Verarbeitungshilfsmittel seien beispielhaft genannt:

- Gleitmittel zur Herabsetzung der Klebrigkeit und Zähigkeit bei der Kunststoffverarbeitung und damit Verbesserung der Fließfähigkeit, Mischbarkeit sowie der Oberflächenglätte der Erzeugnisse;

- Emulgatoren zur Herstellung von Emulsionen und zum Einarbeiten weiterer Zusatzstoffe;
- Härter und Beschleuniger für Reaktionsharze.

Die eingesetzten Funktionsadditive dienen der Abwandlung und/oder Verbesserung der jeweiligen Materialeigenschaften der Kunststoffe. Es wird unterschieden in:

- stabilisierende Additive,
- modifizierende Additive.

Stabilisierende Additive dienen der Verbesserung der Licht-, Wärme- und Sauerstoffbeständigkeit der Fertigerzeugnisse. Für fast alle Kunststoffanwendungen werden chemisch vielfältige Stabilisatorsysteme, die in der Zusammensetzung sowohl auf das verwendete Polymer als auch auf die Gebrauchsanforderungen abgestimmt sein müssen, eingesetzt.

Als modifizierende Additive kommen folgende zur Anwendung:

- Weichmacher sind bestimmte schwerflüchtige Flüssigkeiten, deren Moleküle durch Nebenvalezen an die Kunststoffmoleküle gebunden sind. Weichmacher verringern die Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen, setzen die Erweichungstemperatur und somit die Sprödigkeit und Härte der Kunststoffe herab.
- Füllstoffe sind anorganische oder organische Zusätze in fester Form, die sich in Zusammensetzung und Struktur wesentlich von den Kunststoffen unterscheiden. Füllstoffe dienen teilweise zur Verbilligung der Kunststoffe (inaktive Füllstoffe wie Gesteinsmehle, Papierfasern, Holzmehl) oder zu deren Verfestigung (aktive Füllstoffe). Beispielsweise erhöhen Ruß, gefällte Kieselsäure und Talkum die mechanischen Kennwerte.
- Farbstoffe sind anorganische oder organische Pigmente, die sich durch eine hohe chemische und thermische Beständigkeit auszeichnen.
- Kunststoffe neigen, wegen des hohen Isoliervermögens bzw. aufgrund der fehlenden Feuchtigkeitshaut (Hydrophobie), an der Oberfläche zur elektrostatischen Aufladung, wodurch Staub und Schmutzpartikel angezogen werden. Zur Vermeidung werden Antistatika eingesetzt oder nachträglich auf der Oberfläche aufgebracht (vgl. Kapitel 5.3.3).
- Flammenschutzmittel setzen die Brennbarkeit herab.
- Treibmittel werden bei der Schaumstoffherstellung eingesetzt.

Ein großer Teil der Additive besteht aus halogenierten oder metall-organischen Verbindungen, die teilweise von erheblicher Umweltrelevanz sind. Tabelle 5.5 zeigt einen Ausschnitt der zur Herstellung von Kunststoffen insbesondere von PVC-Produkten eingesetzten Additive. Tabelle 5.6 gibt einen Überblick, über umweltrelevante Inhaltsstoffe ausgewählter Additive.

Die genauen Rezepturen der über 1.000 verschiedenen Additive sind aus Wettbewerbsgründen nicht bekannt. Eine Einschätzung des Gefährdungspotentials ist daher nur für wenige (z. B. Cadmium, Blei, Weichmacher) möglich. Besonders bedenklich sind Organometall- und Schwermetallverbindungen in Stabilisatoren, schwermetallhaltige Pigmente und Azofarbstoffe,

Tabelle 5.5 Additive zur Herstellung von Kunststoffen, insbesondere von PVC-Produkten (Ausschnitt) [69]

Stabilisatoren	Farbmittel	Weichmacher	Sonstige Hilfsmittel
Metallseifen von: – Barium – Blei – Cadmium – Calcium – Zink Organozinnverbindungen Organophosphite Aminocrotonsäureester Harnstoffderivate Epoxydverbindungen Polyole Antioxydantien Bleiverbindungen	Titandioxid Chromgelb Molybdatrot Nickel-Titan-P. Chromtitan Eisenoxid Kobalt-P. Ultramarin Monazo-, Disazo-P. Kondensierte Azo-P. Azomethin Isoindolinon Naphtalin/Perylen-Tetra-Carbonsäure Anthrachinon Indigoide Chinacridon Phthalocyanin Dioxazin Anilin-P. Fettfarbstoffe Polycyclische F. Fluoreszenz-F. F = Farbstoffe P = Pigmente	Phtalsäureester – Dibuthylphthalat – Diisobuthylphthalat – Benzylbuthylphthalat – Dipentylphthalat – Diisooctylphthalat – u. a. Phosphorsäureester – Trikresylphosphat – Diphenylkresylphosphat – Triphenylphosphat – Triethylhexylphosphat Chlorparaffine Adipate – Diethylhexyladipat – Diisononyladipat – Diisodecyladipat Sebacate Trimellithate	Gleitmittel – Fettsäuren, -ester Fettalohole – Fettalkoholester – Amidwachse – Metallseifen – Montansäure, -ester Wachs Paraffine Polymere Verarbeitungshilfsmittel – Methyl-, Buthyl-, Ethylacrylat Füllstoffe – Mineralische Stoffe Mehle von Marmor, Kalkstein, Kreide, Kaolin, Quarz – Nichtmineralische *Ruße, Graphit, *Holzmehle u. a. Schlagzähigkeitsverbesserer Flammenschutzmittel – Aluminiumhydroxid – Borverbindungen Antistatika Treibmittel – chemische Treibmittel *Azodicarbonamid *NaHCO ₃ – physikalische Treibmittel Biostabilisatoren

Phosphorsäureesterabkömmlinge (Nervengas, Kampfstoff, Insektizide) in Weichmachern und Flammenschutzmittel aus Bromverbindungen. Herstellung, Verwendung und Verwertung bergen ein hohes Risiko.

Beim Titandioxid (5 % der Titandioxid-Produktion geht ins PVC) liegt die Umweltgefährdung im vorgelagerten Dünnsäureanfall und deren Entsorgung. Die in PVC-Produkten eingelagerten Schwermetallverbindungen (3.000 Mg Cadmium in PVC-Fenstern, mehrere 100.000 Mg Blei in PVC-Erzeugnissen) werden bei der Entsorgung problematisch (siehe Kap. 1.6).

Tabelle 5.6 Umweltrelevante Inhaltstoffe ausgewählter Additive

Additiv	Umweltrelevante Inhaltstoffe
Stabilisatoren	Schwermetalle, insbes. Blei-, Cd-, Schwefel-, Sn- und Cu-Halogen-Verbindungen
Gleitmittel	Pb-, Zn-haltig
Weichmacher	Chlorparaffine
Füllstoffe und Verstärkungsmittel	Asbest
Pigmente und Farbstoffe	Cd-Basis
Brandschutzmittel	hoch chlorierte Paraffine, Halogen-Sb 203-Synergist, bromidhaltige Verbindungen
Flammenschutzmittel	Halogen-haltig

Die mengenmäßig wichtigsten Additive sind die Weichmacher, deren Anteil beim Weich-PVC bis zu 60 % beträgt. Der Verbrauch von Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP) für PVC-Produkte beträgt jährlich ca. 50.000 Mg DEHP und ist in allen Bereichen der Umwelt in der Bundesrepublik nachweisbar. Aus den ermittelten DEHP-Konzentration von 0,2 bis 5,2 mg/kg Bodensee-Sediment kann geschlossen werden, daß in diesem Fall die Regenerationsfähigkeit der Umwelt (mikrobiologischer Abbau des DEHP) durch den Eintrag überschritten wird. Verschiedene weitere Inhaltsstoffe der PVC-Produkte sind inzwischen überall in der Umwelt nachweisbar [24].

Für beinahe die Gesamtheit der Additive bestehen große Kenntnislücken über das Auftreten und die Wirkung dieser Stoffe auf Mensch und Umwelt. Tabelle 5.6 zeigt eine Zusammenfassung umweltrelevanter Inhaltstoffe.

An der Vielzahl der Additive wird deutlich, mit welchem Aufwand einzelne Werkstoffparameter eingestellt werden. Bei Einsatz von Sekundärmaterial ist die genaue Zusammensetzung der darin enthaltenen Additive nur in den seltensten Fällen bekannt. Werkstoffeigenschaften von Erzeugnissen aus rezykliertem Kunststoff lassen sich somit nicht mit gleicher Genauigkeit einstellen wie bei Verwendung von Primärmaterial. Bei der stofflichen Aufbereitung der Kunststoffabfälle bestehen durch die unbekannte Zusammensetzung mit zum Teil toxischen Additiven nicht abschätzbare gesundheits- und umweltrelevante Risiken, hinzu kommt die Unverträglichkeit verschiedener Kunststoffe untereinander.

6. Maßnahmen zur Optimierung

6.1 Recycling von Kunststoffen aus komplexen Altprodukten

Der größte Teil der Kunststoffe wird im technischen Anwendungsbereich eingesetzt und somit im Verbund bzw. konstruktiv mit anderen Werkstoffen kombiniert. Diese Kunststoffe sind meist höherwertig und damit von einem höheren wirtschaftlichen Wert. Ziel muß es sein, das Problembewußtsein der Erzeuger gezielt in Bezug auf die Entsorgungsverträglichkeit komplexer Produkte zu sensibilisieren.

Ganzheitlich betrachtet umfaßt das Kunststoffrecycling die recyclinggerechte Produktgestaltung, die Erfassung, die Sortentrennung, die stoffliche Aufbereitung und Verarbeitung sowie die Planung des Sekundärproduktes. Da sich Kunststoffe nur sortenrein wirtschaftlich recyceln lassen, kommt der Verbundtrennung ein besonderer Stellenwert zu.

In die Produktentwicklung müssen daher nicht nur Daten über Struktur, Aufbau und Eigenschaft des Kunststoffes und seinen Anwendungsbereich einfließen, sondern auch seine Umweltverträglichkeit und seine Verwertungs- und Recyclingmöglichkeit.

Die heute anfallenden Produkte sind i. d. R. nicht recyclinggerecht gestaltet. Auch die derzeitige Produktgestaltung berücksichtigt die Entsorgung der Abfallprodukte nicht ausreichend. Z. Zt. erfolgt die Überarbeitung der VDI-Richtlinie 2243 zum recyclinggerechten Konstruieren, in der Kunststoffe besonders berücksichtigt werden.

Voraussetzung für die Trennung der verschiedenen Materialien ohne Zerstörung der Einzelteile, ist das Vorhandensein lösbarer Verbindungsstellen. Liegen solche Verbundkonstruktionen nicht vor, so ist nur noch eine grobe Demontage möglich. Shreddern oder Zerkleinern des Produktes macht eine vorherige Trennung durch Aufbereitungsschritte notwendig.

Beispiele für recyclinggerechte Produkte

Die nachfolgenden Beispiele veranschaulichen die Auswirkungen der Optimierung auf verschiedene Verwertungskonzepte.

- Gewichtsminimierung für Wegwerfprodukte
Kunststofftragetaschen sind i. d. R. nach mehrmaligen Gebrauch für die Entsorgung bestimmt. Da sich die heutige Abfallsituation nicht kurzfristig ändern wird, hat Materialeinsparung Vorrang vor Recyclingkonzepten. Anbieten würde sich neben der Verminderung der Größe der Einsatz hochfester Folien, deren Festigkeit durch Eigenverstärkung erreicht wird und der eine geringere Foliendicke ermöglicht. Durch diese Maßnahme werden die Tragetaschen etwas kostspieliger, ihr Gewicht läßt sich so aber mindestens um die Hälfte reduzieren.

- Zerlegbarkeit für eine optimale Verwertung
Entgegen der heutigen Praxis, beispielsweise die Batteriegehäuse im ersten Schritt zu shreddern, um dann im nächsten Schritt die PP-Bruchstücke aus dem Gemisch zu sortieren, bietet sich der Einsatz eines zerlegbaren Akku-Gehäuses an, das durch abdichtende Nut- und Feder-Verbindungen nach Gebrauch zerlegt wird. Die einzelnen Geräteteile lassen sich dann nach der Reinigung direkt weiterverwenden oder nach Zerkleinerung und Aufarbeitung wiederverwerten. Auf die Aufarbeitung kann möglicherweise verzichtet werden, weil die Gehäuse Teile beim direkten Zerlegen weniger verschmutzt sind als nach dem Shreddern der Gesamtbatterie.

- Leichtbau durch lösbare Werkstoffverbunde/
Substitution schwer recycelbarer Kunststoffe
Die Wahl von leicht recycelbaren Thermoplasten wird beeinträchtigt durch die geringere Festigkeit. Abhilfe läßt sich durch Verbundkonstruktion mit Metall erreichen. Die Verbindung läßt sich beispielsweise durch Verkleben in Nuten herstellen. Wird das Metall kurzzeitig relativ hoch erwärmt, lassen sich Klebstoff und Metall trennen, ohne daß der Kunststoff beschädigt wird. So ist z. B. ein Stahl-PVC-Leichtträger kostengünstiger als die Verwendung eines Vollstahlprofils [63].

Das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Berlin greift im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) diese Problematik in dem Projekt „Entsorgungsfreundliche Gestaltung komplexer Produkte“ auf. Im Mittelpunkt stehen Identifikation und Analyse der Gefahren, die aus der Entsorgung immer komplexer werdender Produkte erwachsen. Daneben soll ein sog. „Vorwarn“-Instrumentarium für die Phase der Produktgestaltung geschaffen werden, das eine ökologische und systematische Bewertung der Entsorgungssysteme ermöglicht. Mögliches Resultat aus dem Forschungsvorhaben könnte für die Wirtschaft ein anwendungsorientierter Richtlinienentwurf mit Handlungs- bzw. Gestaltungsmaximen im Bereich von Demontierbarkeit, Materialkennzeichnung, Werkstoffrecycling, Separierbarkeit, Langlebigkeit, Instandhaltungsfreundlichkeit, etc. für die Konstruktion und Entwicklung von entsorgungsfreundlichen komplexen Produkten sein [71].

6.2 Kennzeichnung von Kunststoffen

Die Herstellung dickwandiger Produkte aus gemischten Kunststoffabfällen (z. B. aus Hausmüll), die mit Werkstoffen wie Beton oder Stein konkurrieren, kann nicht primäres Ziel der Kunststoffverwertung sein. Ein wirtschaftliches, in großem Maßstab betriebenes Recycling von vermischten Kunststoffabfällen, setzt daher neben der Abtrennung der Störstoffe vor allem die Trennung der einzelnen Kunststoffarten voraus.

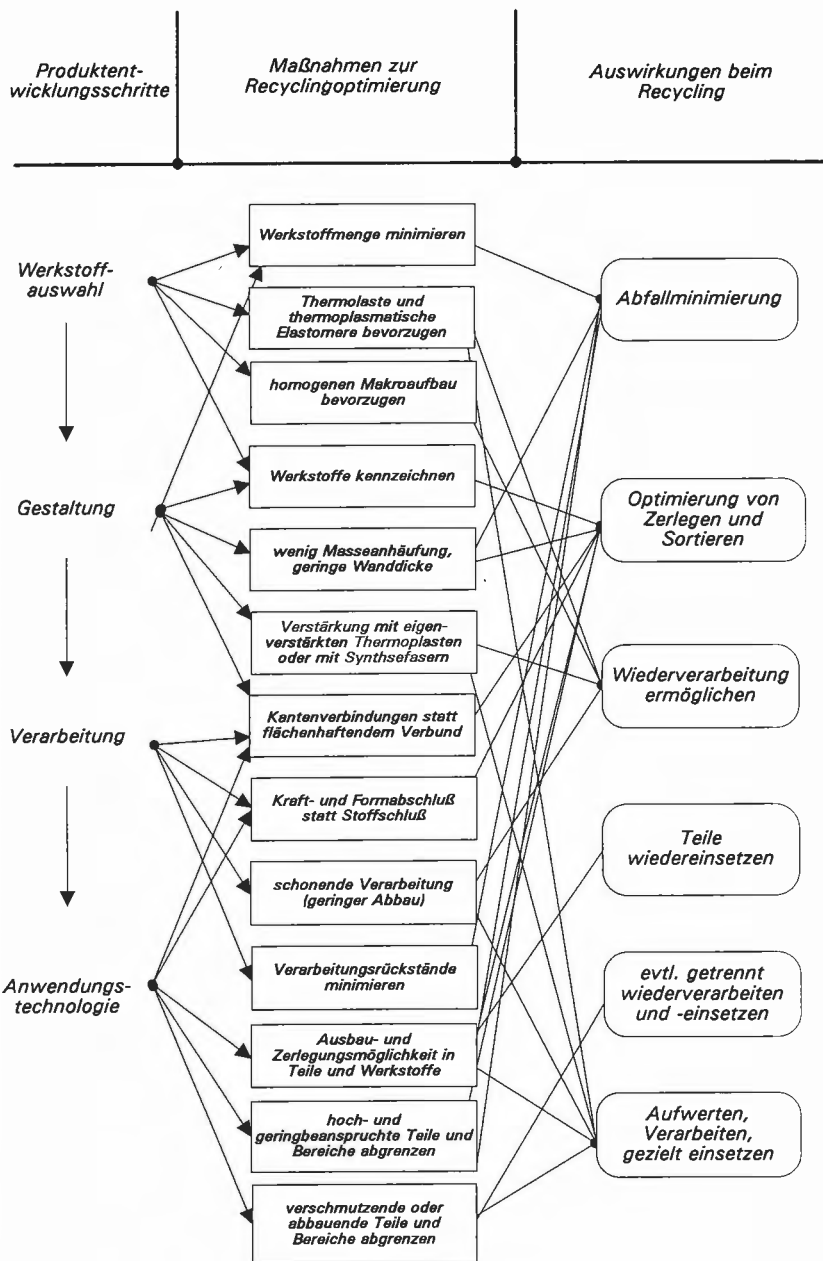
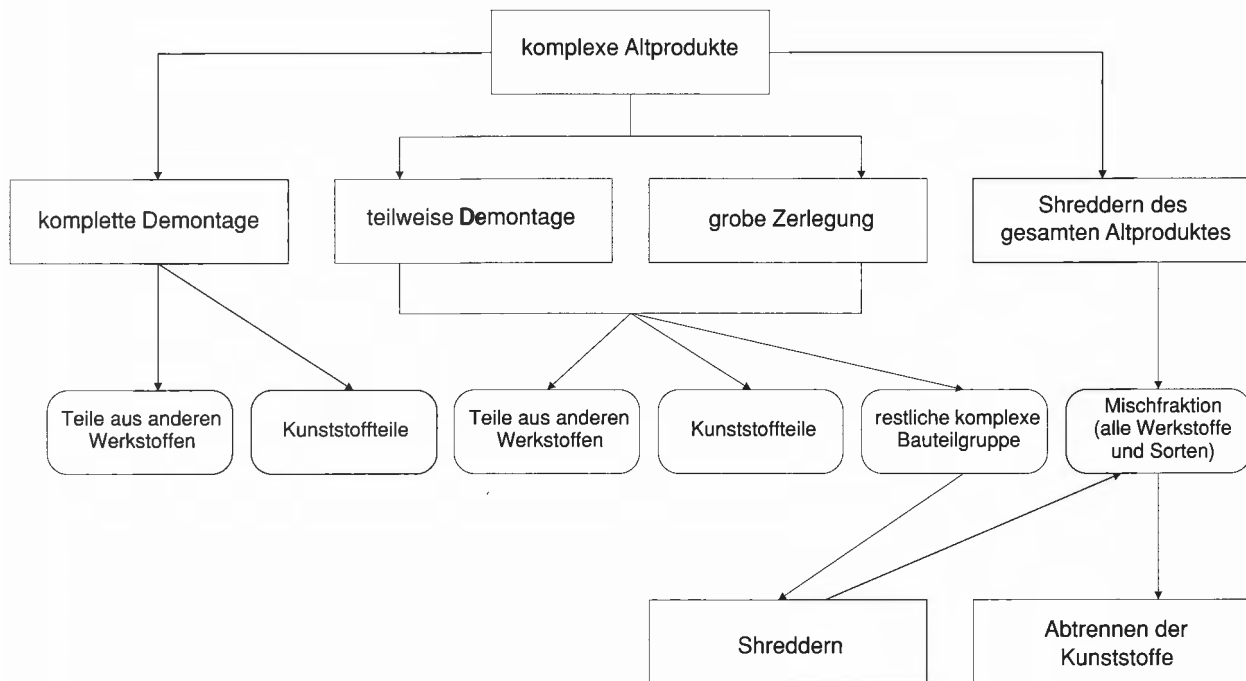


Bild 6.1 Recyclinggerechtes Entwickeln und Konstruieren von Kunststoffprodukten durch Berücksichtigung des Recycling bei allen Entwicklungsschritten [66]

	Sandwichträger mit Deck-schichten aus glasfaserverstärktem Duroplast		Träger aus homogenem Thermoplast		Kunststoff-Stahl-Mischkonstruktion aus homogenem Thermoplast und gekantetem Stahlblech	Stahl-Vierkantring
Recycling-aufwand	sehr groß	groß	sehr klein	groß	klein	mittel
Gewicht [kg/m]	4	5	5	4,5	7,9	13,5
Biegesteifigkeit [$N \cdot mm^2 \cdot 10^{11}$]	2	6	0,2	2,6	9,4	11
DM/ kg	5	6	2,40	11	2,60	2,70

Bild 6.2 Verschiedene Konstruktionen für einen Leichtbau-träger [63]

Bild 6.3 Trennmöglichkeiten von komplexen Altprodukten zur Kunststoffgewinnung [67]



Die maschinelle Auftrennung eines Kunststoffgemisches ist bislang nicht Stand der Technik. Für Hausmüll konzipierte Anlagen sind bisher nur in der Lage, die PE/PP-Fraktion aus dem Kunststoffgemisch abzutrennen und zu hochwertigem Granulat zu verarbeiten. Die weitere Auftrennung in PVC-, PS- oder andere Fraktionen unterbleibt aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen. Zwischen 20 und 40 % der Kunststoffe fallen in diesen Anlagen als Abfall an.

Eine weitergehende Auftrennung kann daher nur von Hand durch den Verbraucher geleistet werden und auch nur dann, wenn dieser von dem Hersteller eines Produktes entsprechende Hinweise (Kennzeichnung) erhält. Bei einer allgemeinen Kennzeichnung der Produkte könnte der Verbraucher z. B. im Rahmen eines Bringsystems (vgl. Kapitel 2.2.2) – ähnlich dem Altglas – seine Kunststoffe in unterschiedliche Behälter einwerfen.

Einen anderen Aspekt stellt die mögliche Verdrängung einzelner Kunststoffe durch ein sich wandelndes Verbraucherverhalten dar. Vorstellbar ist, daß die Öffentlichkeit auf Umweltbeeinträchtigungen einzelner Kunststoffarten bei der Herstellung, Entsorgung oder Verwertung hingewiesen wird und mit einem veränderten Kaufverhalten reagiert. Analoge Beispiele sind phosphatfreie Waschmittel und Pfandflaschen für Milch.

Vor- und Nachteile der Kennzeichnung waren deshalb Ursache umfangreicher Diskussionen. Die chemische Industrie, wie auch der Verband der Kunststoffherzeugenden Industrie, sahen in einer Kennzeichnungspflicht die Gefahr der Diskriminierung einzelner Kunststoffarten – im wesentlichen des PVC – mit entsprechenden Absatzauswirkungen. Überle-

gungen einer speziellen, für den Verbraucher nicht lesbaren Codierung wurden wieder fallen gelassen.

In welchem Maße derartige Kennzeichnungen durch den Verbraucher akzeptiert und befolgt werden, war Bestandteil des Berliner Großversuchs (vgl. Kapitel 3.3.1).

6.3 Qualitätskriterien von Sekundärkunststoffen

6.3.1 Materialprüfung

Die Einsetzbarkeit eines Produkts oder Recyclats für einen Verwendungszweck ist durch eine Materialprüfung nachzuweisen. Der vorgesehene Einsatzbereich bestimmt Art und Umfang der Materialprüfung.

Für eine allgemeine Beurteilung des Recyclats werden möglichst umfassende Informationen über das Eigenschaftsniveau benötigt, um einen Vergleich mit Primärprodukten zu ermöglichen.

Für die spezielle Beurteilung eines Produkts sind Tests erforderlich, die eine Beurteilung hinsichtlich des Verhaltens bei Praxisbeanspruchungen ermöglichen. Die Auswahl der Prüfungen erfolgt zielgerichtet auf den Einsatzzweck.

Fertigungsabfälle, die in großer Menge und gleichbleibender Qualität über längere Zeit anfallen, sind das erfolgversprechendste Material für Recyclingmaßnahmen. Diese Abfälle werden vielfach in den Verarbeitungsbetrieben, in denen diese entstehen, dem Neumaterial zugemischt. Sofern dies auf einen geringen Anteil beschränkt ist, werden keine Eigenschaftsänderungen durch die Zumischung feststellbar sein. Bei höheren Anteilen oder ausschließlicher Verwendung dieser Abfälle hingegen, ist eine Materialprüfung un-

erläßlich, um die Produktqualität sicherzustellen. Die nur geringen Qualitätseinbußen eröffnen einen großen Anwendungsspielraum, so daß nicht nur einfache Artikel, sondern auch technisch hochwertige und beanspruchbare Teile hergestellt werden können.

Gebrauchte Massenartikel bilden neben den Fertigungsabfällen ebenfalls ein wertvolles Potential für die Gewinnung von Sekundärmaterialien. Trotz unterschiedlicher Herkunft und teilweise großer Typenvielfalt sind Massenartikel häufig aus dem gleichen Grundwerkstoff hergestellt. In diese Gruppe der Massenartikel fallen u. a. Flaschenkästen aus PE (Getränkeabfüllung), Einweggeschirr aus PS (Großküchen) und Gehäuse von KFZ-Batterien (Schrotthandel). Die Bandbreite der Produktanwendungen ist hierbei bereits deutlich eingeschränkt. Unabhängig von der Herkunft ist der direkte Kontakt des Sekundärprodukts mit Lebensmitteln nicht vertretbar. Neben der notwendigen Aufbereitung ist eine eingehende Materialprüfung erforderlich.

Kunststoffe aus Privathaushalten fallen gemischt und in unterschiedlichem Maße auch verschmutzt an. Eine Aufbereitung zu Recyclaten, die für die Herstellung hochwertiger technischer Teile notwendig wäre, übersteigt i. d. R. den Preis für Neumaterial. Deshalb ist die Bandbreite für mögliche Einsatzzwecke erheblich kleiner als bei Neuware und die Materialprüfung wird sich auf die Beurteilung der Verarbeitbarkeit sowie die Abgrenzung des Anwendungsbereiches beschränken.

6.3.2 Materialeigenschaften

Recyclate für hochwertige Teile müssen über ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau verfügen. Hierbei sind nicht nur die Produkt- sondern auch die Verarbeitungseigenschaften zu berücksichtigen, um eine störungsfreie Produktion mit gleichbleibenden Maschinenparametern zu gewährleisten.

Nach der Werkstoffprüfung erfolgt die endgültige Eig-

nungsprüfung anhand der Fertigteile. Art und Umfang der Fertigteilprüfungen werden durch Beanspruchung und Lebensdauer vorgegeben. Die tatsächliche Lebensdauer läßt sich nur in Zeitstandversuchen mit hinreichender Sicherheit bestimmen.

Als Vorabschätzung für die Lebensdauer hat sich bei Primärmaterialien der Kurzzeit-Zugversuch bewährt. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß die Ergebnisse mit Sekundärmaterialien nicht in gleicher Weise übertragbar sind. In [77] wird über einen Vergleich zwischen einem Kurzzeit-Zugversuch und einem Zeitstand-Innendruckversuch mit mehrfach extrudierten PE-Rohren berichtet. Dabei wurde das Material nur den für die mehrfache Verarbeitung notwendigen Belastungen ausgesetzt. Auf eine Beanspruchung während der normalen Nutzung wurde verzichtet. Während beim Zugversuch die Abhängigkeit zwischen der Zahl der Extrusionen und der Streckdehnung vernachlässigbar klein ist (Bild 6.4), konnte beim Innendruckversuch eine deutliche Abnahme der Standzeit mit zunehmender Extrusionshäufigkeit festgestellt werden (Bild 6.5).

Die Ergebnisse des Innendruckversuchs wurden an einem PP-Material bestätigt. In der Praxis kommt eine zusätzliche Schädigung des Materials (Festigkeitsabnahme) durch die Beanspruchung während der jeweiligen Nutzungsdauer hinzu.

Daraus muß gefolgert werden, daß der Kurzzeit-Zugversuch bei Recyclaten eine nur sehr geringe Aussagekraft besitzt. Soll dennoch auf die langwierige und teure Zeitstandprüfung verzichtet werden, so bietet sich eine Kombination aus dem Schmelzindex und der Molekülmassenverteilung an. Diese gibt summarisch Auskunft über die Vorschädigung des zu verarbeitenden Materials.

Für Artikel mit geringer Praxisbeanspruchung spielen diese Parameter nur eine untergeordnete Rolle. Statt dessen sind Einfärbung, Oberflächenbeschaffenheit und Reinheit der Produkte zu prüfen.

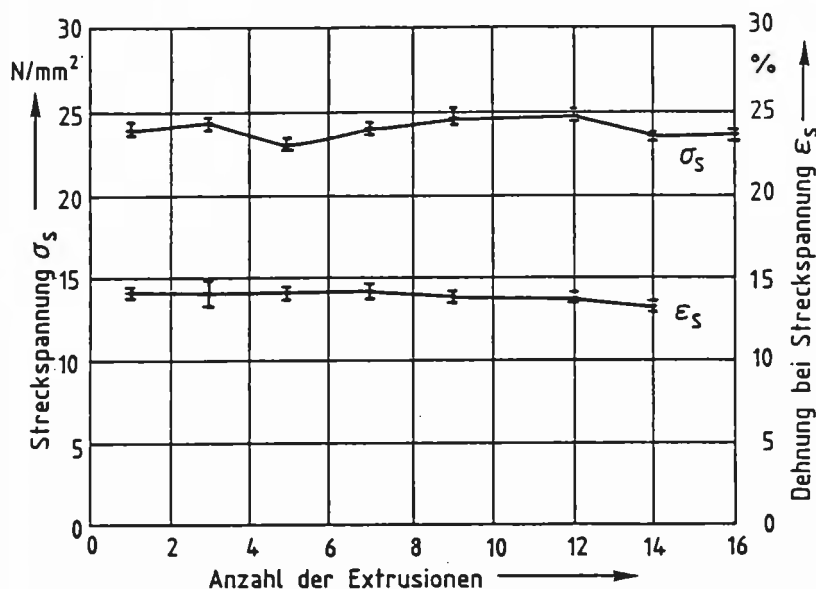
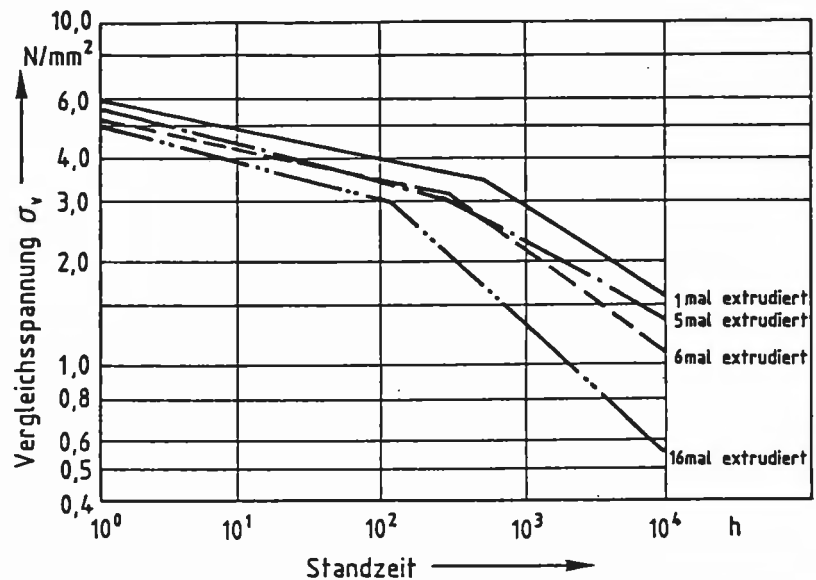


Bild 6.4 Kurzzeit-Zugversuch an Rohren aus mehrfach extrudiertem PE [77]

Bild 6.5 Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren aus mehrfach extrudiertem PE [77]



6.3.3 Mikroskopische Materialprüfung

Der Verschmutzungsgrad mit Fremdpartikeln läßt sich anhand der Polarisationsmikroskopie beurteilen. Das Material wird dabei im Durchlichtmikroskop betrachtet. Dazu ist die Herstellung von Proben mit einer Schichtdicke zwischen 10 und 50 µm je nach Einfärbung des Materials, mit einem Dünnschnittgerät notwendig. Bei Granulat wird die Probe durch Warmverformung hergestellt.

Bei der Betrachtung unter dem Polarisationsmikroskop treten störende Einflüsse (Doppelbrechung), hervorgerufen durch die Oberflächenstruktur oder die Orientierung des Polymers, auf, die durch ein Aufschmelzen der Probe während der Beobachtung unter dem Mikroskop ausgeschaltet werden können. Die Verunreinigungen sind dann deutlich erkennbar, der Anteil läßt sich durch einen Vergleich mit definiert verunreinigten Proben ermitteln. Die Fremdpartikel in µm-Größe sind häufig Ursache für spätere Risse oder Oberflächenfehler im Produkt.

Besonders qualitätsmindernd sind Verunreinigungen, die zur Gasbildung beim Aufschmelzen führen. Auch diese lassen sich mit dem genannten Verfahren feststellen. Darüberhinaus sind auf diesem Weg Aussagen über Ausgangsmaterial, Vorbehandlung und Pigmentierung möglich [21].

6.3.4 Qualitätsstandards für Sekundärstoffe

Qualitätsstandards werden überall dort geschaffen, wo an Produkte und Materialien verschieden hohe Anforderungen gestellt werden, um Preis und Qualität aufeinander abstimmen zu können.

Für Sekundärkunststoffe sind in der Bundesrepublik bislang keine Normen vereinbart worden.

Nachdem in Japan Recycling-Kunststoffe eine größere Verbreitung gefunden haben, wurde 1979 eine erste Japanische Norm (Japanese Industrial Standard, JIS) für Stäbe, Platten und Stangen (JIS K 6931) ge-

schaffen, der später eine Norm für Markierungsstangen (JIS K 6932) folgte.

Die Normen legen folgende Kriterien für die Produkte fest:

- Geltungsbereich,
- Typen,
- Qualität,
- Formen, Abmessungen und Toleranzen,
- Aussehen/Oberflächenbeschaffenheit,
- Meßverfahren für die Qualitätsparameter,
- Anwendung.

Die wesentlichen Qualitätskriterien geben die Tabellen 6.1 und 6.2 wieder. Maßgeblich für die Einordnung in eine der vier Qualitätsstufen sind Dichte (density) und Biegeelastizität (bending elasticity).

Auf die Angabe der JIS wird verzichtet; die Angaben erfolgen in SI-Einheiten.

6.4 Entwicklung und Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen

In den letzten Jahren werden abbaubare Kunststoffe kontrovers diskutiert. Um der Diskussion eine Grundlage zu geben, hat der Industrieverband Verpackung und Folien aus Kunststoff e. V. (IK) ein Positionspapier herausgegeben, das eine Zusammenfassung der Funktionsweisen und Möglichkeiten solcher Systeme aufzeigen soll.

Diese Kunststoffe können durch verschiedene Vorgänge abgebaut werden, es wird zwischen wasserlöslichen, biologisch abbaubaren und fotochemisch abbaubaren Kunststoffen unterschieden. Entsprechend der Grundsubstanz werden aus Stärke, aus Pflanzenölen bzw. aus Stärkezusätzen hergestellte Polymere unterschieden.

Wasserlösliche Kunststoffe

Diese Produkte sind auf der Basis von Acylaten, Alkoholen, Hydroxy-Propyl- oder Ethyl-Zellulose aufge-

Testing item		Performance
Compression strength (lengthwise)	Compression elasticity (kgf/mm ² {N/mm ² })	More than 18 {176}
	Compression proportional limit strength (kgf/mm ² {N/mm ² })	More than 0.3 {2.9}
Impact strength		To be free from snapping, splitting and breaking off.
Heat resistance (%)		To be free from marked warping and twisting. Coefficient of contraction less than $\pm 3^\circ$
Weatherproofness		Less than 7.0
Porosity	Partial (%)	Less than 20
	Whole (%)	Less than 18
Note: (1) Weatherproofness discussed here is based on that of plastic caps and measured by obtaining color differences by lab systems.		
Note: (2) The unit and figures shown in { } are based on the international unit systems (SI).		

Tabelle 6.1 Japanische Qualitätskriterien für Markierungsstangen aus Sekundärkunststoffen

baut und nach dem Auflösen im Wasser einem biologischen Abbau zugänglich. Oft reichen allerdings die Bedingungen einer biologischen Kläranlage nicht aus, um einen vollständigen Abbau zu bewirken. Gerade durch ihre Eigenschaften schließt sich die Anwendung als Verpackungsmaterial z. B. für Lebensmittel aus. Einer der bekanntesten wasserlöslichen Kunst-

stoffe Biopol findet aufgrund seines hohen Herstellungspreises nur begrenzt Anwendung, so z. B. als chirurgisches Nähmaterial.

Fotoabbaubare Kunststoffe

Sie enthalten UV-empfindliche Baugruppen, die ein Verspröden unter Einwirkung von Sonnenlicht bewir-

Tabelle 6.2 Japanische Qualitätskriterien für Stäbe, Stangen und Platten aus Sekundärstoffen

Testing item				Performance							
				Grade 1		Grade 2		Grade 3		Grade 4	
				No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
Density			g/cm ²	Less than 1.0	More than 1.0	Less than 1.0	More than 1.0	Less than 1.0	More than 1.0	Less than 1.0	More than 1.0
Bending elasticity			kgf/mm ² {N/mm ² }	Less than 30 {294}		More than 30 {294} Less than 70 {686}		More than 70 {686} Less than 50 {1471}		More than 150 {1471}	
Bending strength	Bending stress when fractured, or maximum bending stress		kgf/mm ² {N/mm ² }	More than 0.5 {4.9}		More than 1.2 {11.8}		More than 1.7 {16.7}		More than 2.5 {24.5}	
Compression strength	Compression elasticity	Lengthwise	kgf/mm ² {N/mm ² }	More than 8 {78.4}		More than 18 {178}		More than 28 {275}		More than 45 {441}	
		Crosswise	kgf/mm ² {N/mm ² }	More than 3 {29}		More than 8 {78}		More than 13 {127}		More than 20 {196}	
	Compression proportional limit strength	Lengthwise	kgf/mm ² {N/mm ² }	More than 0.1 {1.0}		More than 0.3 {2.9}		More than 0.6 {5.9}		More than 1.2 {1.8}	
		Crosswise	kgf/mm ² {N/mm ² }	More than 0.1 {1.0}		More than 0.3 {2.9}		More than 0.4 {3.9}		More than 0.9 {8.8}	
Porosity		Partial	%	Less than 20 for every three samples							
		Whole	%	More than 18							
Hardness (reference)			H _R R	—		—		(More than 30)		(More than 60)	
Note: Grades 1—4 of performance are categorized based on test results of density and bending elasticity. The unit and figures shown in { } are based on the international unit systems (SI).											

ken. Die kleinen Partikel, in die sie dann verfallen, können von bestimmten Mikroorganismen abgebaut werden. Ein Einsatz ist z. B. in der Landwirtschaft denkbar.

Biologisch abbaubare Kunststoffe

Sie bestehen aus natürlichen Polymeren, die aufgrund enzymatischer Reaktionen durch Mikroorganismen abgebaut werden können. Ihre Nachteile liegen in den hohen Herstellungskosten, der Wasserdampfempfindlichkeit oder der begrenzten chemischen Resistenz.

Biologische Abbaubarkeit kann man definieren als den „Zusammenbruch der physikalischen und chemischen Struktur des Polymers durch Einwirkung lebender Organismen wie z.B. Pilze und Bakterien“. Da es sich um einen biologischen Prozeß handelt, wird die biologische Abbaubarkeit auch durch Umweltfaktoren wie Intensität der mikrobiologischen Umwelt, Feuchtigkeit, Temperatur und andere chemische und physikalische Faktoren bestimmt.

Kunststoffe aus Stärke und Pflanzenölen

Nahezu alle Ansätze der Entwicklung solcher Kunststoffe befinden sich in der frühen Laborphase. Angestrebt wird die Herstellung von Stärkefolien, Amylosefolien auf Basis modifizierter Stärken der verschiedensten Pflanzen oder die Polymerisation langer Fettsäurestrukturen aus pflanzlichen Ölen.

Kunststoffe mit Stärkezusätzen

Hierbei werden herkömmlichen Kunststoffen spezifische stärkehaltige Masterbatches in gewissen Mengen (5 – 20 %) zugegeben. Die Stärke kann u.U. silanisiert oder mit Fettsäuren und Metallverbindungen versetzt sein. Versuche stellen ihre biologische Abbaubarkeit in Frage.

Das IK kommt in seiner Beurteilung zu folgenden Aussagen:

- Lebensmittel- und Hygieneverpackungen müssen sterile Oberflächen aufweisen, ihr inertes Verhalten über lange Zeit besitzen und nicht Ansatzpunkte für pathogene Keime bilden.
Diese Anforderungen können biologisch abbaubare Systeme kaum erfüllen.
- Für die Herstellung und Verarbeitung abbaubarer Kunststoffe ist häufig ein Mehr an Material- und Energieeinsatz notwendig. Dieses läuft konträr zu den Bestrebungen konsequent im Rahmen von Vermeidungsstrategien Materialeinsatz und Umweltbelastungen zu minimieren.
- Der Einsatz abbaubarer Kunststoffe würde dem Recyclingbestreben entgegenstehen.
- Biologische Abbauprozesse führen zur Entstehung undefinierbarer Spaltprodukte, deren Einflüsse auf die komplizierten Ökosysteme heute objektiv noch nicht abzuschätzen sind.
- Im Rahmen eines zeitgemäßen Deponiebetriebes werden sauerstoffarme und vorallem trockene Bedingungen geschaffen, um die Entstehung von undefinierbaren Spaltprodukten und gefährlichen Sickerwässern zu vermeiden.
Mikroorganismen, die den biologischen Abbau aber

bewerkstelligen sollen, benötigen für ihre Tätigkeit Sauerstoff und Feuchtigkeit.

Auf Grundlage dieser Überlegungen erscheint dem IK der Einsatz abbaubarer Kunststoffe für spezielle Anwendungen wie z. B. in der Wasseraufbereitung, der Landwirtschaft, und Medizin von hohem Interesse. Für das breite Anwendungsspektrum ist der Einsatz jedoch nicht sinnvoll. Im Hinblick auf Recyclingbemühungen kann sogar von nachteiligen Wirkungen ausgegangen werden [53].

Im Auftrag des Bundesforschungsministeriums untersucht man derzeit bei der Fraunhofer-Gesellschaft in München die Einsatzmöglichkeiten für abbaubare Kunststoffe. Mit Ergebnissen wird im Spätherbst 1991 gerechnet [101].

- Auch wenn die Forschung dieser Kunststofftypen noch in den Kinderschuhen steckt, so sind seit 1989 bereits zwei Produkte auf dem Markt erhältlich: „Biopol“, Produkt eines englischen Herstellers ICI und „Biocell 163“, hergestellt in Frankreich. Seit 1989 – nach vierjähriger Testphase – füllt eine Kosmetikfirma Shampoo in Biopol-Flaschen ab. Ende 1990 will ein Motorölproduzent sein biologisch abbaubares Schmieröl in abbaubaren Verpackungen anbieten. Verwender von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen machen auf ein sich anbahnendes Problem aufmerksam, das sich aus der geplanten Verpackungsverordnung des Bundesumweltministeriums ergibt: sollen biologisch abbaubare Produkte Sinn und Zweck haben, so müssen sie weiterhin im Hausmüll landen. Nur auf Deponien oder bei der Kompostierung können die Zerfallsprodukte ihre Qualität unter Beweis stellen und ihren hohen Preis rechtfertigen.

Neben dem eingeschränkten Einsatzspektrum für biologisch abbaubare Kunststoffe – so lassen sich z. B. keine alkoholhaltigen Flüssigkeiten in Biopol oder Biocell abfüllen – spricht gegen die Bio-Kunststoffe der hohe Preis. Bei einer Kapazität von derzeit 1.000 Mg/a Biopol liegt der Preis bei 40,- DM/kg. Selbst bei einer Kapazitätserweiterung von 1994 auf 7.000 Mg/a würde der Preis bei ca. 15,- DM/kg liegen und noch immer keine Konkurrenz für die gängigen Kunststoffe wie PE oder PVC (ca. 2,- DM/kg) darstellen.

So rufen die Bio-Kunststoffe allenfalls gedämpfte Euphorie hervor und scheinen z. Zt. nur für Nischenanwendungen denkbar.

Das amerikanische Marktforschungs-Institut Frost & Sullivan Inc. sagt für die abbaubaren Kunststoffe in den nächsten fünf Jahren eine Verdopplung des Verbrauchs für die USA auf über 1 Mio Mg voraus [112].

Die Nachteile von Biopolymeren und bioabbaubaren Polymeren gegenüber recyclingfähigen Kunststoffen lassen sich anhand der folgenden Parameter aufführen [12,156]:

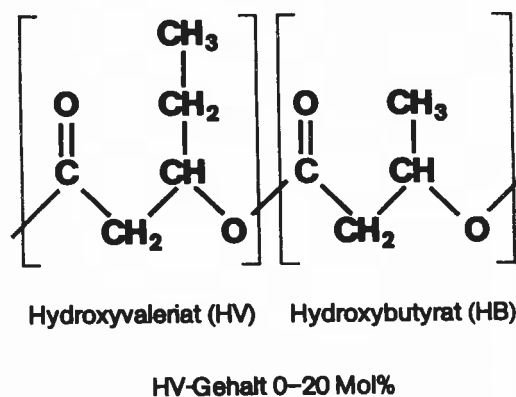
- Der Gesamtenergieaufwand zur Herstellung abbaubarer Kunststoffe wird wesentlich höher sein als der für konventionelle Thermoplaste. Z. Zt. existieren noch keine quantitativen Daten. Qualitativ läßt sich vermuten, daß ein fermentiertes Produkt bzw. ein

Produkt aus intensiver Landwirtschaft wesentlich mehr Energie verbrauchen wird als PE, PP oder PVC.

- Die Recyclingfähigkeit ist definitionsgemäß Null. Dies verursacht einen großen Nachteil in der Ökobilanz, da weder das Material stofflich verwertet noch bei der Verbrennung Energie gewonnen werden kann. Werden biologisch abbaubare Kunststoffe zunehmend für Massenprodukte verwendet, kann in der Praxis keine Quelle gemischter Abfälle mehr frei von abbaubaren Kunststoffen sein. Schon geringe Mengen abbaubarer Kunststoffe vermischt mit recyclefähigen Kunststoffen machen diese Gebinde für die Wiederverwertung wertlos. Die Akzeptanz von Recycling-Rohmaterialien würde dann noch weiter sinken.
- Abbaubare Kunststoffe werfen neue Umweltprobleme auf, besonders auf dem Gebiet der Bodenverschmutzung. Im Vertrauen auf die Abbaubarkeit werden die Umhüllungen meist weggeworfen, verschandeln die Umgebung bis der Abbauprozess – i. d. R. erst nach einigen Monaten – wirksam wird und können Tieren gefährlich werden. Beobachtungen zeigen, daß stärkegefülltes PE sich nur zu kleinen Partikeln abbauen läßt, die aber weiterhin aus PE bestehen. Bei anderen Polymeren erfolgt der Abbau zu organischen Materialien, über die noch die Informationen über ihre Umweltwirkung fehlen. Durch die Zersetzung von Kunststoffen wird der Energiegehalt dieser Materialien freigesetzt, ohne genutzt zu werden.
- Bisher fehlen entsprechende Untersuchungen, ob die organischen Produkte, die als Zerfallsprodukte entstehen wirklich harmlos sind. „Wie kann es akzeptabel sein, abbaubare Kunststoffe wegzuerwerfen, wenn man die Verbrennung von Kunststoffen als Umweltgefahr verdammt?“ So hält sich bisher auch die Nahrungsindustrie zurück, da niemand bis jetzt weiß, welche Produkte bei einem vorzeitigen Abbau entstehen.
- Abbaubare Kunststoffe müssen sich nach dem Gebrauch genau in dem Medium wiederfinden, das ihren Abbau garantieren kann. So lassen sich weder fotochemische Kunststoffe unter Lichtabschluß noch biologische Kunststoffe in Abwesenheit der notwendigen Bakterien in der vorhergesehenen Art und Weise abbauen.
- Anfangs wirkte die Idee der biologisch abbaubaren Kunststoffe so überzeugend, daß bereits 16 US-Bundesstaaten vorschrieben, daß die Umhüllungen der Verpackungen der Sechsergebinde Bier aus abbaubaren Kunststoffen zu bestehen haben.

Trotz aller Kritikpunkte an biologisch abbaubaren Kunststoffen hat für den US-Markt das Marktforschungsinstitut Strategy Analysis Inc. in einer Studie für diverse Absatzmärkte eine durchaus positiv Bilanz gezogen. In der Studie prognostiziert das Unternehmen zweistellige Zuwachsraten. Trotz der günstigen Einschätzung wird sowohl in Verbraucher- als auch in Industrieverbänden diskutiert, ob mit den abbaubaren Kunststoffen die Frage nach einer organisatorisch

Bild 6.6 Biopol-Copolymere [52]



funktionierenden und kostenmäßig akzeptablen Entsorgung beantwortet werden kann [72].

Biopol

Biopol (Polyhydroxybutyrat-Cohydroxyvalerat, PHB/V), ein thermoplastischer Kunststoff, wird durch einen Mikroorganismus im Fermentationsprozeß mit Zucker hergestellt: die Bakterie „*Alcaligenes eutrophus*“ produziert den Stoff aus Kohlehydraten/organischen Säuren in Form langkettiger Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle, so wie der menschliche Körper Fett speichert. Das Material kann von in der Natur vorkommenden Pilzen und Bakterien vollständig zu CO₂ und Wasser zersetzt werden. In Bezug auf Haltbarkeit, Stabilität und Wasserbeständigkeit soll es jedoch mit herkömmlichen Thermoplasten vergleichbar sein. Unter Bedingungen, wie sie in anaeroben Abwässern vorliegen, kann Biopol in wenigen Wochen abgebaut werden. Die erste Fermentationsanlage befindet sich in Billingham/Nordostengland [102].

Unter kontrollierten Bedingungen kann das Erdbakterium *Alcaligenes eutrophus* bis zu 80 % seines Trockengewichtes als Biopol-Homopolymer (PHB) anreichern. Ihr relativer Polyhydroxybutyrat- (PHB) und Polyhydroxyvalerat- (PHV) Anteil läßt sich durch Modifikation der Gärungsbedingungen regulieren, unter denen sich die Bakterien entwickeln.

Diese Zellen werden dann geerntet. In einem patentierten Verfahren wird das wasserunlösliche Polymer mit einer 95 %igen Reinheit gewonnen. Nach der Trennung von der Zellmasse wird das Polymer gefiltert, getrocknet und liegt entweder als Pulver oder Granulat vor. Es kann anschließend wie herkömmlicher Kunststoff verarbeitet werden.

Das Polymer PHB ist ein hochkristallines, steifes und etwas sprödes Material, dessen Plastizität mit steigendem PHV-Anteil zunimmt, das bei 173 bis 180 °C schmilzt und bei 0 bis 4 °C in einen glasigen Zustand übergeht. Wie beim PET sind diese Polyester sehr instabil bei höheren Temperaturen.

Die Eigenschaften des Biopols lassen sich durch Zusatz von Weichmachern, Schlagfestigkeits-Modifizierern oder verstärkenden Füllstoffen auf den jeweiligen Verwendungszweck abstimmen.

Tabelle 6.3 Typische mechanische Eigenschaften von verschiedenen Biopolgütern [103]

	HV-Anteil		
	0 %	10 %	20 %
Schmelzpunkt [°C]	180	140	130
Zugfestigkeit [MPa]	40	25	20
Biegemodul [GPa]	3,5	1,2	0,8
Bruchdehnung [%]	6	20	50
Kerbschlagzähigkeit nach Izod [J/m ²]	60	110	350

Im Handel sind diese Polymere als Pulver oder Granulat. Die Tabelle 6.3 enthält einige typische mechanische Eigenschaften der verschiedenen Biopolgütern.

Um das Produkt PHB zu erforschen, hat der englische Rohstoffhersteller eine Tochterfirma 1983 in Großbritannien gegründet, die an den kommerziellen Anwendungen des Polymers arbeitet und das Ziel verfolgt, die Herstellung von Biopol zu verbilligen und weitere Anwendungsgebiete zu erschließen [104].

Mater Bi

Mater Bi ist ein biologisch abbaubarer Kunststoff, der von einer italienischen Firma im September 1990 auf den Markt gebracht wurde. Der Kunststoff soll folgende Eigenschaften in sich vereinen:

- mehrmalige Wiederverwertung ohne Veränderung der Eigenschaften,
- brennbar mit einem mittleren Heizwert ohne Bildung von schädlichen Stoffen,
- biologisch abbaubar unter aeroben Bedingungen zu H₂O und CO₂, unter anaeroben zu Methan,
- kompostierbar mit anderen städtischen Abfällen und als Dünger verwendbar.

In Untersuchungen nach dem Sturm-Test weist eine Probe nach zehn Monaten unter aeroben Bedingungen einen Gewichtsverlust von 91 % und eine biologische Abbaurrate von 78 % auf. Unter anaeroben Bedingungen zeigt die Probe nach sechs Monaten einen Gewichtsverlust von 61 %.

Erhebungen über den Zerfall im Untergrund ergaben folgende Daten:

<u>Tage</u>	<u>Gewichtsverlust</u>
7	> 39 %
21	> 50 %
49	> 55 %

Der Kunststoff setzt sich aus ca. 60 % Stärke und 40 % synthetischen nichtthermoplastischen Polymeren mit sehr niedrigem Molgewicht, teilweise oxidiert mit hydrophilen Eigenschaften zusammen. Er enthält weder Katalysatorstoffe, noch Metalle, Mineralien oder Füllstoffe. Er besitzt eine netzartige Struktur mit starken homogenen Wasserstoffbindungen. Das Material kann in gängigen Verarbeitungsverfahren zum Einsatz gebracht werden: Extrusion, Blasenformen, Tiefziehen.

Mater Bi wird seit 1990 in Terni (Italien) mit einer Jahresproduktion von 5.000 Mg/a produziert. Für September 1991 ist der Bau einer neuen Anlage ebenfalls in Terni mit einer Kapazität von 20.000 Mg/a geplant [84].

Biocell 163

Biocell 163, ein Kunststoff, der auf Basis von Cellulosediacetat, das aus Holzcellulose gewonnen wird, soll nach Angaben der Hersteller kompostierbar oder ohne Bildung giftiger Rückstände oder Zersetzungsprodukte verbrennbar sein.

Biocell zeigt im Sturm-Test bei einer Wandstärke von 0,25 mm eine biologische Abbaubarkeit von ca. 18 % nach 200 Tagen. Die Zersetzungsraten einer zerkleinerten Folie liegt nach 200 Tagen bei über 40 %. Innerhalb von 12–18 Monaten soll der Kunststoff restlos abgebaut sein.

Über die biologische Abbaubarkeit in Kompost-Erde/Klärschlamm wurden folgende Daten ermittelt:

<u>Tage</u>	<u>Gewichtsverlust</u>
7	ca. 8 %
21	ca. 22 %
49	ca. 45 %

Die Wärmeformbeständigkeit des Materials liegt bei ca. 60 °C, bis ca. minus 20 °C ist es flexibel. Die Zugfestigkeit erreicht ähnliche Werte wie Polyethylen-Folie.

Der Kunststoff wird als verarbeitungsfähiges Granulat geliefert und läßt sich im Spritzguß und mittels Extrusion verarbeiten [46].

Amyplast

Amyplast, ein biologisch abbaubarer Kunststoff, ist von einer belgischen Firma entwickelt worden. Das Produkt soll insbesondere der Herstellung von Behältern für flüssige Nahrungsmittel dienen. Der Zersetzungszeitraum wird je nach exogenen Bedingungen mit 6 bis 24 Monaten angegeben. Dabei wird die Abbaubarkeit durch den Zusatz von 5 bis 7 % Prozent Stärke bei Folien bzw. 6 bis 12 % bei Behältern gesichert. Der Abbauprozess läßt sich in drei Stufen gliedern: der Abbau der Stärke durch Mikroorganismen, der chemische Abbau, in dem die Polymere gespalten werden und der biochemische Abbau der Kunststoff-Grundbausteine [72].

Biokunststoff aus Kohlenoxiden

Aus dem Labor einer in Tokio ansässigen Firma wird die Entwicklung eines Biokunststoffes aus Kohlenmonoxid, der zu den Polyglycoliden zu zählen ist, gemeldet. Synthetisiert wird der Kunststoff in Drucktanks bei 14,26–19,62 MPa bei einer Temperatur um 150 °C. Als Starthelfer dient Formaldehyd, das in einem – bislang geheimgehaltenen – Lösungsmittel gelöst ist. Z. Zt. laufen die Patentierungsformalitäten. Die Abbaubarkeit der Polyglycolide als Folie entspricht in etwa der Polybutyrate (Bipol). Im Vergleich zur bakteriellen Synthese nimmt die Synthese aus Kohlenmonoxid nur knapp zwei Stunden in Anspruch. Polyglycolide weisen sehr gute mechanische Eigenschaften auf. Ihre Temperaturbeständigkeit liegt um 200 °C; sie zerfallen bei knapp 300 °C. Momentan laufen in den Labors Versuche, um das aus Kohle-

kraftwerken und petrochemischen Anlagen frei werdende Kohlendioxid mit diesem Kunststoffverfahren zu kombinieren und damit einen Weg zu eröffnen, das unerwünscht in die Atmosphäre entweichende Kohlendioxid, einer Produktion zuzuführen [143].

Kunststoff-Folie mit Stärkezusatz

In einer von einem deutschen Folienhersteller in Auftrag gegebenen Studie wurde eine mit Stärke-Additiven ausgerüstete Polyethylen-Folien auf biologische Abbaubarkeit getestet. Hierzu wurden die Folien einem zeitgerafften Kompostierverfahren unterworfen und das Abbauvermögen durch Zugversuche und mikroskopische Untersuchungen an Dünnschichten untersucht. Als Referenzmaterial diente stärkefreie PE-Folie und als Kontrast Baumwoll- und naturbelassene Jutgarne. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, daß die untersuchte stark modifizierte Folie nicht biologisch abbaubar ist [72].

Auf der Deponie werden Kunststoff-Folien mit eingebetteten Stärkemolekülen nicht – wie vorgesehen – von Mikroorganismen in Kunststoff-Teilstücke zerlegt. Der Grund liegt in einem Verfahrensfehler: durch die hohen Temperaturen verbrennt die Stärke und wird ungenießbar. Wird das Verfahren dahingehend geändert, daß die Stärke in einer kühleren Produktionsphase zugegeben wird, kann der Fehler behoben werden [15].

Belland AG

Die Schweizer Belland AG hat einen Kunststoff entwickelt, der sich bei Kontakt mit einer in Wasser gelösten Chemikalie in mikroskopisch kleine Partikel zerlegen soll. Eine mögliche Anwendung findet sich bei der Fertigung von hygienischen Einmal-Abdeckungen für Toiletten-Brillen oder in der Landwirtschaft. Der zerstörende Wirkstoff wird in einer zweiten Folien-schicht integriert und entfaltet bei Kontakt mit Wasser seine Wirkung. McDonalds plant den Einsatz dieser Kunststoffe als Verpackungsmaterialien, die nach Gebrauch einer zu planenden Wiederaufbereitungsanlage zugeführt werden sollen, um die Zerfallsprodukte zurückzugewinnen und in der Kunststoffproduktion wieder einzusetzen [15].

6.5 Substitutionsmöglichkeiten von halogenierten Thermoplasten

Die umweltrelevanten Problembereiche, die mit der Produktion, Verarbeitung, Nutzung, Aufbereitung und Entsorgung von halogenierten Thermoplasten verbunden sind, haben eine breite Diskussion entfacht. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen empfiehlt in seinem Sondergutachten „Abfallwirtschaft“ vom November 1990 der Bundesregierung das sofortige und vollständige Verbot von Cadmium in Verbindung mit PVC-Produkten und das Verbot von PVC als Verpackungsmaterial. In Österreich hat das Umweltbundesamt (Wien) im Auftrag des Österreichischen Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familien eine Studie über Umweltprobleme durch PVC erstellt, die sämtliche Probleme bei der Herstellung, Anwendung und Entsorgung von PVC sowie die Möglichkeiten zur Substitution von PVC aus der Sicht mehrerer Institutionen umfassend darstellt [146].

Im Rahmen dieser und anderer Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Abschätzung der Umweltrelevanz von PVC werden auch Möglichkeiten der Substitution untersucht. Die umweltbelastenden Stoffmengen können einerseits durch Substitution einzelner Inhaltsstoffe durch weniger belastende Substanzen, andererseits durch Substitution von PVC selbst reduziert werden. Die cadmium- und bleihaltigen Additive etwa werden in Schweden zunehmend durch Calcium/Zink-Stabilisatoren substituiert [69].

Die Substitution von PVC durch andere Kunststoffe und andere Werkstoffe ist auch Gegenstand von Versuchen zu Ökobilanzierungen. Diese Untersuchungen beziehen eine unterschiedliche Anzahl von beeinflussenden Parametern und unterschiedliche Ebenen der betrachteten Stoffströme ein und kommen daher auch zu unterschiedlichen teilweise widersprüchlichen Aussagen. Die Komplexität der Aufgabe, die Umweltrelevanz einzelner Werkstoffe im Rahmen einer Ökobilanz umfassend zu beurteilen, kann möglicherweise keine objektiven Ergebnisse erbringen.

Die bislang bekannten Umweltprobleme im Zusammenhang mit den Stoffströmen halogener Thermoplaste sprechen für eine Substitution in Bereichen, wo andere Werkstoffe mit vergleichbaren Qualitätsstandards zur Verfügung stehen.

Produkte aus PVC lassen sich in folgenden Bereichen durch andere Werkstoffe/Kunststoffe ersetzen:

Verpackungen und Verpackungsmaterial (Folien und Hohlkörper):

- PVC-Weichfolien sind ersetzbar durch Folien aus PE, PP, Vinylacetat (VA), im Einzelfall kann auch Aluminium die umweltverträglichere Alternative sein;
- PVC-Hohlkörper sind ersetzbar durch Mehrweg-Gläser, Weißblech, PE und Karton;

Baustoffe:

- Abwasserrohre, Frischwasserrohre, Dachrinnen aus PVC sind ersetzbar durch Beton, Steinzeug, PE, bzw. Kupfer, Stahl, bzw. Zink;
- Fußbodenbeläge sind ersetzbar durch Holz, Keramik, Kork, Linoleum;
- Fenster-, Türprofile sind ersetzbar durch Holz (bei Tropenholz ist ein Herkunftsnachweis aus geordneter Plantagen-, Forstwirtschaft einforderbar), u. U. Aluminium;
- Kabelummantelungen aus PVC mit bleihaltigen Stabilisatoren sind ersetzbar durch andere Kunststoffe.

Büro- und Schulbedarf:

- Radiergummis, Lineale aus PVC sind ersetzbar durch andere Kunststoffe;

Kinderspielzeug:

- Kinderspielzeug aus Weich-PVC ist ersetzbar durch andere Kunststoffe, Holzspielzeug.

In der Bundesrepublik gibt es Initiativen und Kampagnen von Städten, Gemeinden sowie Verbraucher- und Umweltgruppen, PVC-haltige Produkte zu ver-

meiden bzw. durch andere Werkstoffe/Kunststoffe zu ersetzen.

Die öffentliche Verwaltung kann in verschiedenen Bereichen durch entsprechende Richtlinien den Einsatz PVC-haltiger Baustoffe, Produkte und Packmittel beschränken oder diese vollständig durch andere Werkstoffe ersetzen lassen. Entsprechende Vorgaben, z. B. bei den Förderbestimmungen für den Wohnungsbau, bei Abfallsatzungen, bei Richtlinien für die öffentliche Beschaffung, werden von Städten und Gemeinden in zunehmendem Maße gemacht. Die Städte Wuppertal, Bielefeld und Aachen bevorzugen bei Ausschreibungen für öffentliche Baumaßnahmen Baustoffe ohne PVC, Bremen plant eine Änderung der entsprechenden Ausschreibungsrichtlinien. Die Wohnungsbauförderungsbestimmungen für Berlin wurden 1990 geändert. Demnach dürfen in öffentlich geförderten Bauten u.a. mit Fluorchlorkohlenwasserstoffen hergestellte Baustoffe (Schaumdämmplatten, Ortschäume) und die folgenden Bauteile aus Polyvinylchlorid (PVC) nicht verwendet werden [2]:

- ab 1.1.1992 Zu- und Abwasserleitungen,
Fußbodenbeläge,
Tapeten und
Kleinbauteile im Wohnungsinnenbereich
- ab 1.1.1995 Fenster- und Türprofile.

6.6 Direkte Wiederverwertung von Duroplastabfällen

Duroplastabfälle können nicht auf dem einfachen Weg der Schmelze verwertet werden. Deshalb ist die Verwertung nicht nur bei Duroplasten aus Hausmüll sondern auch bei den Produktherstellern ein vielfach ungelöstes Problem.

In einem Forschungsprogramm wurde ein Verwertungsverfahren entwickelt, das auf einer Feinstvermahlung mit anschließender Verwendung als Füllstoff beruht [109].

Ausgehärtete Duroplaste in Form von Angüssen, Verteilern und Ausschußteilen werden mit einer Schneidmühle vorzerkleinert und anschließend mit einer Hammermühle auf eine maximale Größe von 0,8 mm nachzerkleinert. Das Material wurde in Anteilen bis zu 20 % der Neuware beigemischt und zu Normstäben verpreßt. Eingehende Materialuntersuchungen ergaben keine signifikanten Unterschiede zu ungemischten Teilen. Bei einer Wirtschaftlichkeitsberechnung ergaben sich Einsparungen in Höhe von ca. 500 DM/Mg Produkt durch verringerten Materialeinsatz und verminderte Abfallentsorgung.

7. Technische Grundlagen und Verfahren

Die Verwertung von Kunststoffabfällen kann prinzipiell über den Weg einer physikalisch-mechanischen, chemischen, chemisch-physikalischen oder thermischen Behandlung erfolgen. Während bei der physikalischen Behandlung die Herstellung von Regranulat oder Mischfraktionen für Sekundärprodukte im Vordergrund steht, ist das Ziel der chemischen und thermischen Behandlung die Gewinnung der im Kunststoff enthaltenen Grundsubstanzen bzw. deren Umsetzung in Energie (Bild 7.1).

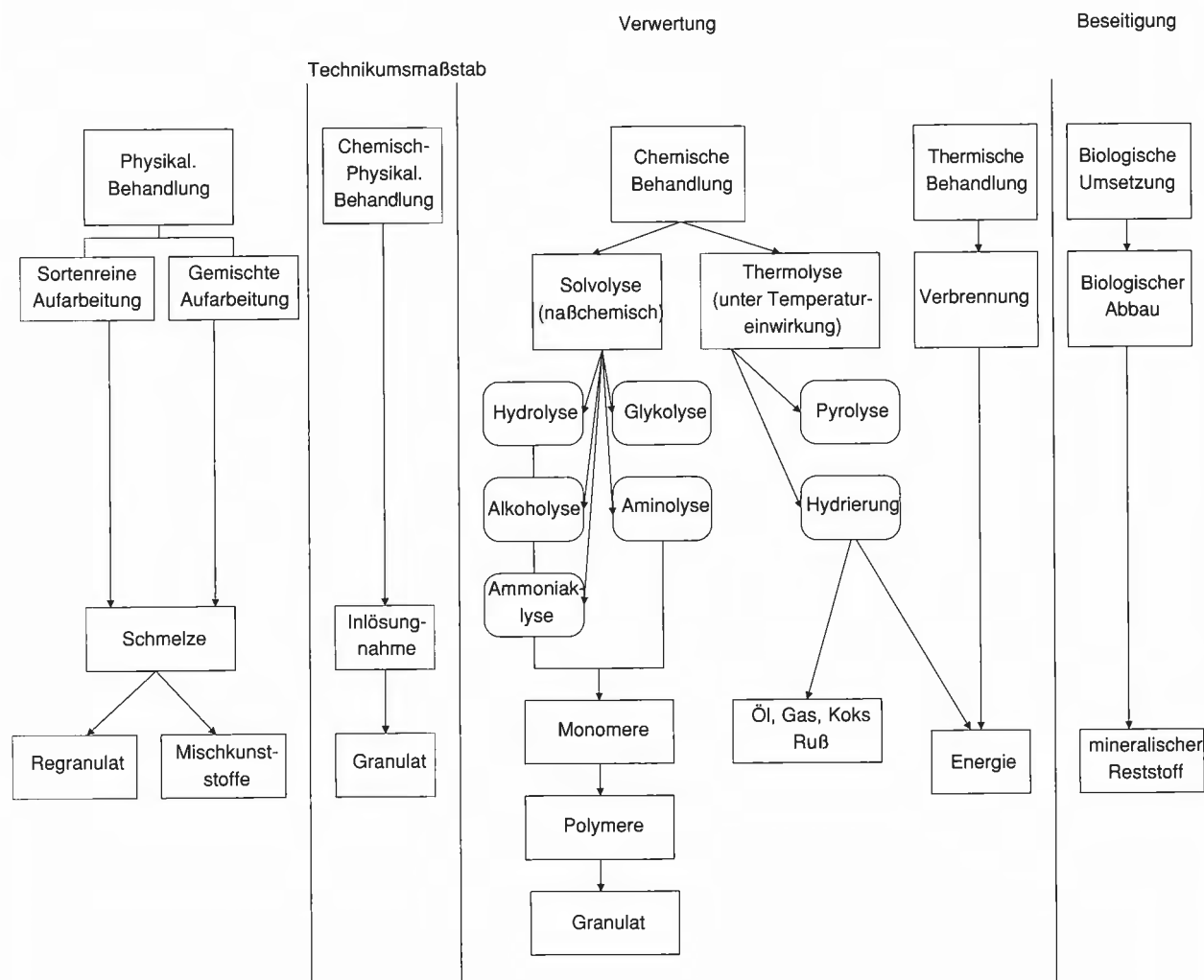
Bei den chemisch-physikalischen Verfahren werden polymere Wertstoffe durch Inlösungnahme aufbereitet. Durch die Inlösungnahme läßt sich auch ein Trennen unterschiedlicher Kunststoffe erreichen; ein Aspekt, der besonders beim Recycling von Verbundkonstruktionen von Interesse ist. Im Gegensatz zu chemischen Verfahren wird das Polymer nicht in Mo-

nomere aufgespalten. Entsprechend seiner molekularen Verhältnisse läßt es sich fraktionieren. Wirtschaftlich angewendet wird diese Form des Recyclings bei der Aufbereitung von Plexiglas aus verbrauchten Hubschrauberteilen.

Biologisch gewonnene Kunststoffe setzen bei der biologischen Umsetzung die gebundene Energie durch einen bakteriellen Abbau zu CO_2 und H_2O frei, wobei eine mineralische Substanz als Reststoff bestehen bleibt. Im Gegensatz zu der physikalischen, chemischen, chemisch-physikalischen und thermischen Behandlung handelt es sich bei der biologischen Umsetzung um keine stoffliche und/oder energetische Verwertung, sondern um eine Zersetzung/Beseitigung spezieller Kunststoffe unter biotischen Faktoren.

Kunststoffe fallen als Abfall sowohl in der kunststoff-

Bild 7.1 Systematik der Behandlungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen



erzeugenden als auch in der kunststoffverarbeitenden Industrie sowie bei den Endverbrauchern an. Die kunststofferzeugende und -verarbeitende Industrie ist seit längerem bemüht, Kunststoffabfälle möglichst weitgehend innerbetrieblich wiederzuverwerten, während die Möglichkeiten der Aufbereitung bei den weiterverarbeitenden Betrieben und Endverbrauchern eher begrenzt sind.

Ein erheblicher Teil, insbesondere der vermischten Kunststoffabfälle, muß daher noch gemeinsam mit dem übrigen Hausmüll deponiert oder verbrannt werden.

Die Zerkleinerung ist als Grundoperation für praktisch alle Behandlungsverfahren Voraussetzung. Während bei der Hydrolyse und Pyrolyse eine grobe Zerkleinerung ausreichend ist, erfolgt bei Aufbereitungsverfahren, die Regranulate erzeugen, in unterschiedlichem Maße zusätzlich eine Klassierung oder Sortierung zur Ausscheidung von Störstoffen bzw. zur Auftrennung in unterschiedliche Kunststoffarten.

7.1 Zerkleinern

Die Zerkleinerung hat innerhalb der Kunststoffsauflbereitung eine besondere Bedeutung. Im Rahmen des Forschungsprogramms „Wiederverwertung von Kunststoffabfällen“ des Verbandes Kunststofferzeugende Industrie (VKE) wurden umfangreiche Untersuchungen zur Zerkleinerung von Kunststoffen aus Hausmüll durchgeführt [74].

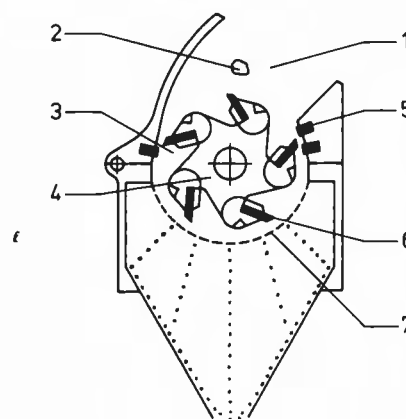
Die Auswahl des Zerkleinerungsaggregats richtet sich nach den geforderten Eigenschaften des Produkts sowie nach der Erscheinungsform und den Abmessungen des zu zerkleinernden Materials.

Bei der Zerkleinerung von Kunststoffen aus Hausmüll ist eine zweistufige Zerkleinerung sinnvoll, wobei zwischen der Vorzerkleinerungsstufe und der Zerkleinerungsstufe eine Abtrennung der Metallanteile durch Windsichtung oder Magnetscheidung erfolgt. Der Verschleiß der Schneidmesser durch metallische Verunreinigungen kann so minimiert werden.

Für die Vorzerkleinerung werden Shredder bzw. Schneidwalzenzerkleinerer, Schneckenzerkleinerer und Spalter eingesetzt. Shredder oder Schneidwalzenzerkleinerer eignen sich zur Vorzerkleinerung zäher, hochfester Kunststoffe, ganzer Folienballen, großer Hohlkörper (z. B. Mülltonnen) und Verbundmaterialien Kunststoff/Metall (z. B. Kabel, Telefonapparate). Im geschlossenen Shredder laufen zwei oder vier Schneidwellen. Die Umlaufgeschwindigkeiten der Schneidwellen sind stark unterschiedlich und erzeugen dadurch einen Schneidvorgang. Diese Maschinen haben einen Durchsatz von bis zu 3 Mg/h.

Schneckenzerkleinerer eignen sich zur Vorzerkleinerung voluminöser Kunststoffteile wie Säcke, Schaumstoffteile und gemischter und verunreinigter Kunststoffe. Bei stark mit Holz und Papier verunreinigten Kunststoffen ist eine spätere Trennung nicht wirtschaftlich durchführbar, eine Verbrennung mit Abgasreinigung ist daher vorzuziehen. Beim Schneckenzerkleinerer wird das Input-Material zwischen zwei bis zu sechs parallel angeordneten Schneckenwellen

Bild 7.2 Schematischer Aufbau einer Schneidmühle [74]



- | | |
|---------------------|----------------|
| 1 Aufgabeschacht | 5 Statormesser |
| 2 zerkleinertes Gut | 6 Rotormesser |
| 3 Mahlraum | 7 Sieb |
| 4 Stator | |

eingezogen und vorzerkleinert. Die Schneckenwellen drehen sich einzeln und unabhängig voneinander. Das Aggregat kann direkt von Radladern beschickt werden. Die Durchsatzleistung liegt bei bis zu 10 Mg/h.

Spalter oder Guillotine-Scheren eignen sich zur Vorzerkleinerung großer Kunststoffabfallteile, die miteinander verschmolzen sind oder sich ineinander verhakt haben. Die Beschickung des Spalters kann kontinuierlich gestaltet werden [47].

Die **Zerkleinerung** zu Granulat erfolgt in schnelllaufenden Prallmühlen und insbesondere in Schneidmühlen. **Schneidmühlen** eignen sich zur Zerkleinerung von nahezu allen Kunststoffsorten und bieten sich auch zur Zerkleinerung von Restkunststoffen an. Es können verschiedene Kornverteilungen bis zu < 1 – 2 mm erzeugt werden.

Bild 7.2 zeigt den schematischen Aufbau einer Schneidmühle. Der zu zerkleinernde Kunststoff (2) wird über den Aufgabeschacht (1) dem Mahlraum (3) zugeführt, vom Rotor (4) erfaßt und zwischen den Statormessern (5) und den Schneidmessern (6) zerkleinert. Das erzeugte Granulat kann den Mahlraum erst dann verlassen, wenn die Partikelabmessungen kleiner sind als die Maschenweite des Siebeinsatzes (7).

Das zerkleinerte Material wird direkt unterhalb des Siebes aufgefangen und pneumatisch aus der Mühle abgesaugt. In einem nachgeschalteten Zyklon wird das Mahlgut von der Trägerluft getrennt.

Bei der Zerkleinerung von Folien oder Schaumstoffen ist der Einsatz einer Absauganlage unbedingt erforderlich, um ein Zusetzen der Sieböffnungen zu vermeiden. Gute Ergebnisse werden bei einem Sieb mit

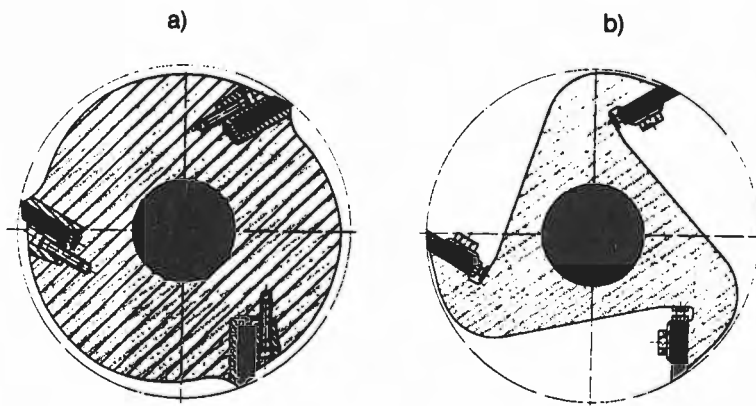


Bild 7.3 Rotorformen bei Schneidemühlen [74]

- a) geschlossener Rotor zur Zerkleinerung von Kompaktkörpern
b) offener Rotor zur Zerkleinerung von Folien, Hohlkörpern, Schäumen

einer Maschenweite von 12 mm erzielt [74]. Die mittlere Korngröße lag bei diesen Versuchen zwischen 4 und 8 mm.

Schneidemühlen eignen sich auch für die Zerkleinerung von großstückigen Kunststoff-Formkörpern, die nicht vorzerkleinert wurden. Dazu werden Schneidemühlen mit "geschlossenen Rotoren" bevorzugt. Die Schneidmesser sind dabei am Umfang einer Vollwalze befestigt und haben einen Vorstand zwischen 4 und 15 mm (Bild 7.3 a). Offene Rotoren werden bei Materialien eingesetzt, deren Eigenschaften und Formen variieren (z. B. Folien, Schaumstoffe) (Bild 7.3 b).

Der massenbezogene Energiebedarf des Mahlvorgangs hängt von der Stoffart, der Erscheinungsform (Kompakmaterial, Folie, Schaum, Hohlkörper) und der Gestalt (zerkleinerte Folien, Rohre usw.) des Materials ab. Versuche zeigen, daß bei der Zerkleinerung von Kompakmaterialien aus PE, PVC und PS (Vollkörper in der Größenordnung von Fensterprofilen, Rohren) eine stoffliche Abhängigkeit des massenbezogenen Energiebedarfs besteht. Der Energiebedarf nimmt dabei in der Reihenfolge PE - PVC - PS ab. Bei der Zerkleinerung von Folien treten Unterschiede und Schwankungen im Energiebedarf auf. Erheblichen Einfluß hat insbesondere die Gestalt der Folien. Zerknitterte Folien weisen einen höheren Energiebedarf auf als glatte.

Der zur Zerkleinerung von Kunststoffmischungen erforderliche Energiebedarf von 30 – 35 kWh/Mg läßt sich durch Übertragung der an reinen Komponenten ermittelten Daten berechnen.

Eine Weiterentwicklung stellen die **Schneidemühlen mit Doppelschrägschnitt** dar. Diese Mühlen können auch als Naßmühlen eingesetzt werden und bewähren sich insbesondere bei der Zerkleinerung vermischter und verschmutzter Kunststoffe aus Haushaltsabfällen. Zur Erzeugung des Doppelschrägschnitts werden Rotor- und Statormesser schräg angeordnet. Durch Schrägstellung von Rotor und Gehäuse im gleichen, jedoch entgegengesetzten Winkel entsteht an jeder Stelle der gleiche Schnittpalt. Die Messer selbst werden konventionell gerade geschliffen. Die beschriebene geometrisch exakte Anordnung

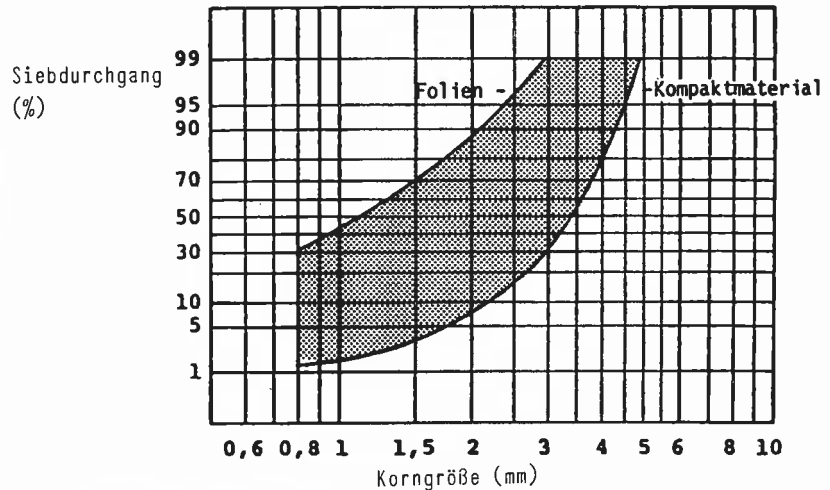
der Rotor- und Statormesser gleicht dem Scherenschnitt, der Energiebedarf des Schneidvorgangs ist dadurch sehr gering.

Durch den scherenden Schnitt werden die Kunststoffe nicht auf ganzer Länge abgeschlagen, sondern diese werden punktförmig zerkleinert. Der Energiebedarf und die Geräuschemissionen werden dadurch reduziert, die Standzeit der Messer erhöht sich.

Die Aufbereitung verschmutzter Kunststoffe aus Haushaltsabfällen macht Waschverfahren notwendig. Durch Kombination der Zerkleinerung mit dem Waschen wurden gängige Verfahren weiterentwickelt. Bei der **Naßzerkleinerung** wird vorzerkleinertes Material nach einer Vorwäsche (Grobgutabtrennung) in die Naßmühle eingetragen. Dabei wird zusätzlich Wasser zugegeben. Aus der Mühle wird ein Gemisch von Kunststoff und abgetrenntem Schmutz ausgetragen und im nachgeschalteten Friktionswäscher mittels einer schnelllaufenden Schnecke entwässert. Dabei wird ein Großteil des Schmutzwassers abgeschleudert. Vorteile der Naßzerkleinerung gegenüber der Trockenzerkleinerung sind die verbesserte Ablösung von Verschmutzungen, mehrfache Standzeiten der Messer, kein Einreiben von Schmutz in die Schnittstellen am Kunststoffmaterial [47].

Einige Kunststoffe werden nach der Aufbereitung nicht als Granulat, sondern als Pulver weiterverarbeitet. Ein Zerkleinerungsaggregat zum Feinmahlen von Kunststoffen ist die **Prallscheibenmühle**, die sich insbesondere für die Aufbereitung von PVC-Abfällen oder auch von Weichschaumabfällen anbietet. Die Materialaufgabe erfolgt zentrisch über eine feststehende, in die Gehäusetür eingebaute Mahlscheibe gegen die sich eine zweite Scheibe im Inneren des Mahlraumes bewegt. Durch Zentrifugalkraft wird das Material gegen die riffelartigen, konisch angeordneten Zerkleinerungszonen geschleudert. Der Grad der Zerkleinerung wird bestimmt durch den Abstand und die Riffelform der Scheiben. Der kleinvolumige, kompakte Mahlraum nimmt nur soviel Material auf, wie tatsächlich zerkleinert wird. Das hat den Vorteil, daß Wirkungsgradverluste und Temperaturbelastungen des Materials, die durch unnötiges Umherwälzen entstehen, vermieden werden. Der Energieverbrauch beim Feinmahlvorgang wird mit 100 – 250 kWh/Mg angegeben [105].

Bild 7.4 Korngrößenverteilung zerkleinerter Kunststoffe bei Verwendung eines 6 mm-Mahlraumsiebes in einer Hammermühle [74]



7.2 Klassieren

Unter Klassierung wird die Auftrennung eines Korngemisches aufgrund von Unterschieden in Korngröße und Kornform verstanden.

Dazu eignen sich prinzipiell die Aufbereitungsverfahren

- Siebung,
- Sichtung.

Die Klassierung kann bei der Wiederverarbeitung homogener Kunststoffabfälle zur Trennung nach Feinheitsmerkmalen der Partikel wie Korngröße oder Sinkgeschwindigkeit eingesetzt werden.

Die Klassierverfahren Siebung und Sichtung können darüberhinaus zur Sortierung herangezogen werden, wenn die zerkleinerten Produkte stoffabhängige Korngrößenverteilungen oder Sinkgeschwindigkeitsverteilungen besitzen [13,74].

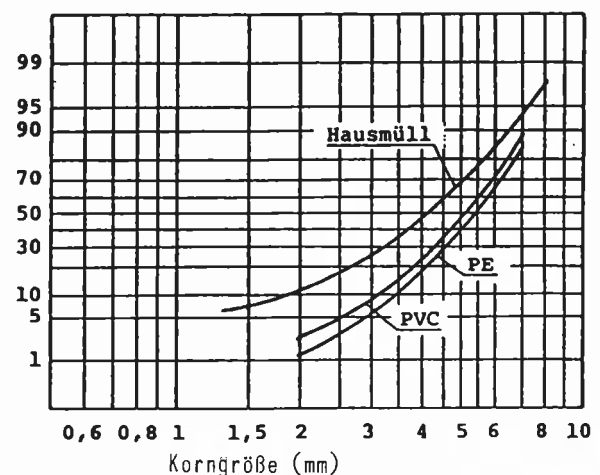
Ziel der Klassierung von Mehrkomponentengemischen ist die Anreicherung einzelner Kornparameter bei möglichst großer Ausbeute.

7.2.1 Sieben

Zur Beurteilung eines Klassiererfolges mittels Siebung ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung des Inputmaterials erforderlich.

Bild 7.5 Korngrößenverteilung zerkleinerter Kunststoffe bei Verwendung eines 12 mm-Mahlraumsiebes in einer Hammermühle [74]

Siebdurchgang (%)



Für bestimmte Sortierverfahren (z.B. Schwimm-Sink-Verfahren) und Verarbeitungsprozesse (z.B. Schmelze) werden Korngrößen > 1 mm als notwendig angesehen. Versuche bei Verwendung eines Mahlraumsiebes in einer Hammermühle mit 6 mm Maschenweite zeigten, daß bis zu 45 % der Produktmasse auf < 1 mm zerkleinert wurden. Dieser Anteil würde damit einer Wiederverwertung in den genannten Prozessen entzogen werden (Bild 7.4).

Bei der Zerkleinerung von Kompaktmaterialien (PE, PVC) liegt der Feinanteil < 1 mm zwischen 1,5 % und 4 %, bei Folien zwischen 5 % und 45 %.

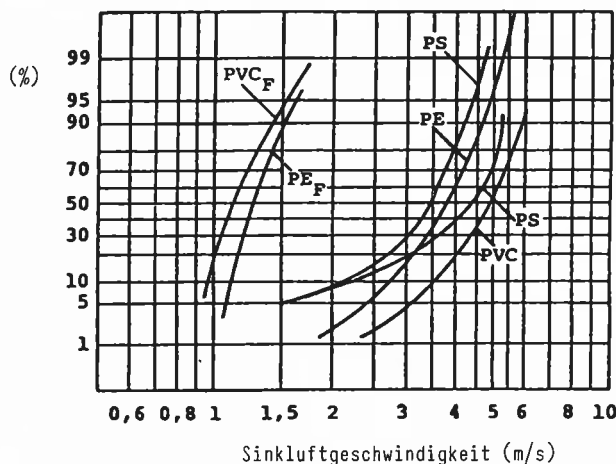
Der Feinanteil läßt sich erheblich reduzieren, wenn die Maschenweite des Siebes auf 12 mm vergrößert wird (Bild 7.5).

7.2.2 Sichten

Während bei der Siebung eine Trennung des Mahlgutes ausschließlich nach der Korngröße stattfindet, erfolgt die Klassierung mittels Strömungstrennverfahren wie z.B. der Windsichtung nach der Sinkgeschwindigkeit (Gleichfälligkeit) im Luftstrom. Die Sinkgeschwindigkeit ist eine Funktion von Größe, Dichte und Form der Partikel.

Die Sinkgeschwindigkeitsverteilungen unterschiedlicher Kunststoffe in einem Zick-Zack-Windsichter sind in Bild 7.6 dargestellt.

Bild 7.6 Sinkgeschwindigkeitsverteilungen ermittelt mit Labor-Zick-Zack-Windsichter MZM 40 x 40 [74]



PVC mit der größten Feststoffdichte weist die höchsten Sinkgeschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 6 m/s auf. Polystyrol liegt im Bereich zwischen 1,6 m/s und 5,3 m/s. Bei Polystyrol zeigt sich insbesondere der Einfluß der Partikelabmessungen. Entsprechend der geringen Dichte ($0,95 \text{ g/m}^3$) liegt die Sinkgeschwindigkeit von PE niedriger als von PVC.

Bei der Sinkgeschwindigkeitsverteilung von Folien ist der Dichteinfluß von untergeordneter Bedeutung. Die PVC-Folie weist kleinere Sinkgeschwindigkeiten auf als die PE-Folie. Die Sinkgeschwindigkeit wird entscheidend von der für die Siebung maßgeblichen Abmessung und der Folienstärke beeinflusst.

Da die Sinkgeschwindigkeit bei Formteilen von der Partikelgröße abhängt, kann die Windsichtung dazu verwendet werden, den Anteil an feinen Partikeln zu reduzieren. Um eine gewünschte Korngröße zu erhalten, ist bei der Sichtung mit einem größeren Überkornanteil zu rechnen als bei der Siebung. Dies ist insbesondere auf die unterschiedliche Form der Teile zurückzuführen.

Die Entscheidung, ob eine Siebung oder Windsichtung zur Abtrennung des Feinanteils einzusetzen ist, kann nur unter Berücksichtigung der nachfolgenden Sortier- bzw. Verarbeitungsverfahren getroffen werden.

Ist ausschließlich die geometrische Abmessung von Bedeutung, so ist infolge des geringen Materialverlustes die Siebung einer Windsichtung vorzuziehen. Bei hohen Massendurchsätzen kann eine Kombination aus Sichtung und Siebung sinnvoll eingesetzt werden. Durch die vorhergehende Windsichtung kann die Siebbelastung um den Faktor 5 verringert werden, da ausschließlich das Feingut der Siebung zugeführt werden muß.

Die Investitionskosten für die Siebung vermindern sich dadurch erheblich, so daß sich trotz der für eine vorgeschaltete Windsichtung zusätzlich erforderlichen

Investition die Gesamtanlagekosten unter Umständen reduzieren.

Für nachgeschaltete nasse Sortierprozesse wie z.B. die Flotation kann die Windsichtung zur Abtrennung des Feinanteils verwendet werden, da hierdurch vor allem faden- und plättchenförmige Partikel entfernt werden. Diese könnten bei nassen Verfahren zu Verunreinigungen und damit ungünstigeren Sortiierungsergebnissen führen.

Bei Mehrkomponentengemischen, in denen sich die Gleichfälligkeit der beteiligten Komponenten beträchtlich unterscheidet, tritt häufig die Schwierigkeit der Wahl eines geeigneten Trennschnittes auf. Einerseits werden zu große Partikel der Komponente mit der geringeren Dichte abgetrennt und andererseits verbleiben zu feine Partikel der Komponente mit der höheren Dichte im weiterzuverarbeitenden Produkt.

7.3 Sortierung

Zum Unterschied zur Klassierung werden bei der Sortierung von Kunststoffen die physikalischen Partikelmerkmale wie z.B. Dichte, Benetzbarkeit und Leitfähigkeit herangezogen.

Der Erfolg der Sortierung hängt entscheidend von der Partikelgröße und damit von einer vorhergehenden Klassierung nach der Korngröße oder der Sinkgeschwindigkeit und dem Verschmutzungsgrad ab (Tabelle 7.1).

7.3.1 Dichtesortierung

Die Auftrennung der Kunststoffpartikel nach der Dichte ist das am meisten angewandte Verfahren. Bei der Dichtentrennung mit flüssigen Medien gibt es zwei Verfahren:

- Schwimm-Sink-Verfahren im Schwerkräftfeld,
- Hydrozyklon-Verfahren (Schwimm-Sink-Verfahren im Zentrifugalfeld).

Mit Schwimm-Sink-Verfahren lassen sich aus Kunststoffmischungen Fraktionen mit Reinheiten von über 98 % herstellen, wobei jedoch eine Auftrennung der Weich-PVC-Sorten nicht möglich ist. Die natürliche Hydrophobie der Kunststoffe ist für den Trennprozeß durch geeignete Netzmittel aufzuheben.

Bei gemischten Kunststoffen aus dem Haushalts- und Gewerbebereich liegt die Dichte der zu trennenden Komponenten in den Grenzen:

$$\text{PE} < 0,98 \text{ g/cm}^3 < \text{PS} < 1,05 \text{ g/cm}^3 < \text{PVC}$$

Entsprechend diesen Differenzen wird die Dichte der Trennflüssigkeit z.B. mit CaCl_2 (220 g/l) eingestellt. Um eine gute Trennung zu erreichen, muß durch Zugabe von weiteren Chemikalien die Oberfläche der Kunststoffe benetzbar gemacht werden.

Bei der Trennung einer hausmüllähnlichen Kunststofffraktion aus Granulat ohne Verunreinigungen im Trennmedium Wasser (Dichte $1,0 \text{ g/cm}^3$), konnte eine Polyolefinfraktion mit mehr als 98 % Reinheit ausgebracht werden. Die Schwerfraktion setzte sich aus PS und PVC zusammen, wobei der Fehlastrag aus weniger als 2 % PS bestand.

Tabelle 7.1 Übersicht über Trennverfahren zur Kunststoffsortierung [4]

Trennparameter	Trennverfahren	Korngröße	Voraussetzungen
Dichte	<u>Trocknen:</u> Strömungsverfahren im Gasstrom	> 1 mm	enger Korngrößenbereich großer Dichteunterschied
Dichte	<u>Naß:</u> Strömungsverfahren mit Wasser Schwimm-Sink-Scheidung Schwerflüssigkeitszyklonierung	> 1 mm > 1 mm > 0,5 mm	— " — Dichteunterschied 0,02 g/cm ³
optische Eigenschaften	automatische Klaubeverfahren	> 1 mm	enger Korngrößenbereich
thermische Eigenschaften	automatische Klaubeverfahren	einige mm	
elektrische Eigenschaften	Elektrohochspannungsscheidung	> 1 mm	enger Korngrößenbereich
Benetzbarkeit mit Wasser	Flotation	0,2	max. Korngröße nicht bekannt

Fehlasträge im Schwimmgut wurden hauptsächlich aufgrund von Feianteilen in dem Aufgabegut hervorgerufen. Diese könnten beispielsweise durch eine vorherige Windsichtung abgeschieden werden.

Die Nachtrennung der Sinkfraktion in einer CaCl_2 -Lösung brachte eine Anreicherung von > 98 % für PS und PVC.

Für den Trennerfolg ist maßgeblich, daß in der Trennzone keine Turbulenzen auftreten, die zum Aufschwimmen der Schwerfraktion führen. Durch diese Gefahr ist der Durchsatz bei Schwimm-Sink-Scheidern begrenzt.

Bei Anwendung von statischen (diskontinuierlichen) Schwimm-Sink-Scheidern sind zur Vermeidung von Turbulenzen aufwendige Konstruktionen erforderlich [13].

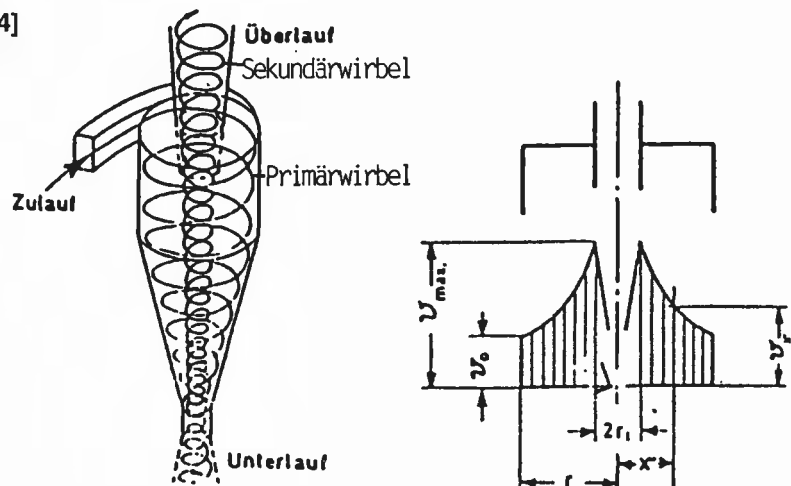
Aus wirtschaftlicher Sicht sind nur kontinuierlich arbeitende Schwimm-Sink-Scheider sinnvoll.

Beim **Hydrozyklon** erfolgt die Trennung der verschiedenen Kunststoffe in einem Zentrifugalkraftfeld. Durch die Zyklongeometrie wird ein aufwärtsgerichteter Innenwirbel zum Ausbringen der Leichtfraktion und ein abwärtsgerichteter Außenwirbel zum Ausbringen der Schwerfraktion unter hohem Druck erzeugt. Die Suspension, bestehend aus Kunststoff und Wasser, wird tangential zugeführt. Die Austrittsöffnung wirkt wie eine Drossel, die nur die in Wandnähe angereicherten Partikel austreten läßt. Die Drosselwirkung der Unteraufdüse lenkt den Partikelstrom um in den entgegengesetzten Sekundärwirbel (Bild 7.7).

Der Hydrozyklon zeichnet sich gegenüber dem Schwimm-Sink-Verfahren durch einen einfacheren Aufbau - keine komplizierten Einbauten - und einen höheren Durchsatz aus.

Die Qualität der Anreicherung der einzelnen Kunststoffarten in den Hydrozyklonstufen wird entscheidend von dem vorgeschalteten Zerkleinerungsprozeß beeinflußt.

Bild 7.7 Schema eines Hydrozyklons [4]



Im Rahmen der Untersuchungen des VKE wurden Versuche im Technikumsmaßstab an einem Hydrozyklon mit einer Kapazität von 1 Mg/h durchgeführt [4]. Die verwendeten Kunststoffe wurden aus Hausmüll separiert. Der Anteil der Verunreinigungen betrug 1 – 5 % (Papier, Metall, Sand). Die mittlere Zusammensetzung bestand aus 80 – 85 % PE, 2 – 10 % PS und 8 – 15 % PVC. Die Versuche ergaben einen nahezu 100 %-igen Austrag von Polyethylen, mit einem Fehlaustrag von 2 – 3 % an Polystyrol. Ein Fehlaustrag von PVC konnte in der Polyethylenfraktion nicht festgestellt werden. Die Nachsortierung der Schwerfraktion aus Polystyrol und PVC aus dem Unterlauf des Zyklons ergab, daß bei PVC eine nahezu 100%ige Anreicherung erreicht wird. Polystyrol konnte zu etwa 95 % angereichert werden, der Fehlaustrag bestand aus geringen Mengen an PVC und eventuell Polyethylen. Der Großteil der enthaltenen Verunreinigungen wurde zusammen mit dem PVC als Schwerfraktion abgeschieden.

Der mittlere Frischwasserverbrauch betrug 0,2 m³/Mg Aufgabegut, der auf Haftwasser beim Zyklonaustrag zurückzuführen ist. Der Energiebedarf betrug 36 kWh/Mg. Eine überschlägige Kostenrechnung ergab bei einem Jahresdurchsatz von 4.000 Mg Sortierkosten von ca. 36 DM/Mg [4].

Für Zerkleinerung und anschließende Sortierung mit Hilfe eines Hydrozyklons in die einzelnen Kunststoffsorten berechnen sich Kosten von über 115,- DM/Mg.

7.3.2 Flotation

Die Trennung bei der Flotation beruht auf dem Prinzip, daß sich an die hydrophobe Oberfläche von Kunststoffen selektiv Luftblasen anlagern und diese die Kunststoffe an die Oberfläche schwimmen. Die selektive Trennung wird durch den Zusatz von Reagenzien zum Trennmedium erreicht, wodurch die Anlagerung von Luftblasen an bestimmte Kunststoffsorten verhindert werden kann. Die aufgeschwemmte Kunststofffraktion kann an der Oberfläche abgezogen werden.

In einer Reihe von Versuchen konnte gezeigt werden, daß gegenüber der Hydrozyklontrennung eine weitere Verringerung des PS-Fehlaustrags im Polyolefinprodukt zu erreichen ist.

In einer 100-l-Flotationszelle konnten Anreicherungen von über 99 % bei der Auftrennung von Zweikomponenten-Gemischen, die sich aus Kombinationen der Kunststoffe PE, PS und PVC ergaben, erreicht werden. Durch Vergrößerung der Flotationszellen konnte der Fehlaustrag entscheidend verringert werden. Der Reagenzienverbrauch bei der Trennung der einzelnen Kunststoffsorten schwankte zwischen 5 und 150 ml/l. Der Durchsatz betrug 75 kg/h. Die Sortierkosten lagen bei 30 DM/Mg [4].

Im Gegensatz zum Schwimm-Sink-Verfahren ist mit Hilfe der Flotation auch eine Trennung der PVC-Fraktion in die Komponenten PVC-weich und PVC-hart möglich.

7.3.3 Elektrostatische Sortierung

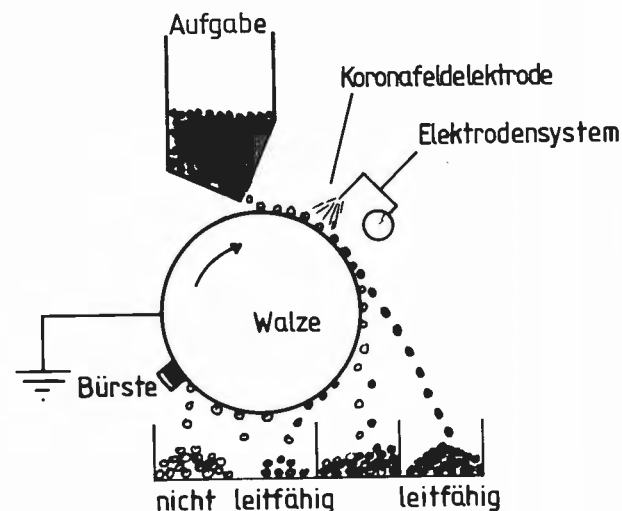
Die elektrostatische Sortierung trennt Kunststoffe aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit. Nach einer elektrostatischen Aufladung in einem Hochspannungsfeld kann sich die leitfähige Komponente an einem geerdeten Körper entladen, während die nicht (oder weniger) leitfähige Komponente sich nicht (oder kaum) entlädt und an dem geerdeten Körper anhaftet.

Die Wirksamkeit des Verfahrens wurde an einem Hochspannungslaborwalzenscheider untersucht. Das Aufgabegut wurde durch ein Koronafeld (elektrisches Feld um eine Sprühelektrode) aufgeladen. Der nicht leitfähige Kunststoff haftet durch die elektrostatische Wechselwirkung auf der Walze und muß mit einer Bürste abgenommen werden. Mit Hilfe einer justierbaren Trenneinrichtung war es möglich, drei Fraktionen zu erzielen, wobei die mittlere ein Mischprodukt darstellt (Bild 7.8) [4].

Da sich die Leitfähigkeit der einzelnen Kunststoffe nicht in dem Maße unterscheidet, wie es für eine Trennung notwendig wäre, wurden Antistatika entwickelt, die die Oberflächenleitfähigkeit der Kunststoffe um mehrere Zehnerpotenzen erhöhen. Die Selektivität der Antistatika, d.h. die Wirksamkeit auf einzelne Kunststoffarten, ist Voraussetzung für die Effizienz des Verfahrens. Bisher sind keine ausreichend selektiven Antistatika bekannt, die die Trennung eines hausmüll-typischen Kunststoffgemisches zulassen. Derzeit besteht die Möglichkeit in einigen Fällen die Trennung von zwei Kunststoffarten (z.B. PVC-weich von PS) zu erreichen [4].

Die Trennung von verschmutzten Kunststoffen ist erst nach einer intensiven Reinigung möglich. Die elektrostatische Sortierung scheint daher wenig geeignet, um vermischte und verschmutzte Kunststoffe zu trennen.

Bild 7.8 Schematische Darstellung der Trennung eines Kunststoff-Gemisches mit einem Koronawalzenscheider



7.3.4 Automatische Klaubeverfahren

Die Nutzung optischer (Laserstrahl mit IR-Analyse) und thermischer (Erweiterungspunkt, Wärmeleitfähigkeit) Eigenschaften zur Sortierung von Kunststoffen mittels Verfahren zur vollautomatischen Klaubung sind bisher noch nicht ausreichend untersucht worden. Bisherige Ergebnisse wurden nicht veröffentlicht.

7.4 Schmelze

Die Kunststofffraktion des Hausmülls besteht zu über 90% aus Thermoplasten, die sich theoretisch über die Schmelze wiederverwerten lassen. Voraussetzung für die Umschmelzung von gemischten Thermoplasten ist jedoch ein Anteil von mindestens 50 % einer Trägersubstanz, die aus einer Kunststoffsorte besteht. Die Zusammensetzung des Anteils an Thermoplasten im Hausmüll beträgt:

60 – 65 Gew.-%	Polyolefine
15 – 20 Gew.-%	Polystyrol
10 – 15 Gew.-%	PVC
ca. 5 Gew.-%	sonstige Kunststoffe und Verunreinigungen

Die Umschmelzung der Thermoplaste ist der verfahrenstechnisch kürzeste Weg zur Herstellung neuer Produkte. Die Verarbeitung erfolgt in Form von Granulierung, Extrusion, Schäumung, Spritzgießen oder Pressung.

7.4.1 Granulieren

Aus der sortierten und gereinigten Kunststofffraktion kann über die Schmelze entweder direkt das Produkt oder als Zwischenschritt ein Granulat hergestellt werden, das sich zu Kunststoffprodukten verarbeiten läßt.

Bei der Granulatherstellung wird unterschieden zwischen Heißabschlag- und Kaltgranulierung. Bei der Heißabschlaggranulierung wird die plastische Kunststoffformmasse von einem vor einer Düsenplatte rotierenden Messer abgeschabt.

Zum Herstellen von zylindrischem Granulat nach dem Verfahren der Kaltgranulierung werden die aus der Düsenplatte austretenden Stränge durch ein Wasserbad gezogen und kühlen dort ab. Die Stränge gelangen in einen Granulator und werden durch eine rotierende Messerwalze in 2 bis 3 mm lange Partikel geschnitten.

7.4.2 Extrudieren

Grundsätzlich sind alle Thermoplaste extrudierbar, die im Schmelzzustand eine hohe Viskosität aufweisen.

Der mengenmäßig am meisten durch Extrusion verarbeitete Thermoplast ist das PVC, gefolgt von Polyethylen und von Polypropylen.

Neben den kompakten Extrudaten aus Vollkunststoff können auch strukturgeschäumte Extrudate hergestellt werden. Strukturgeschäumte Extrudate bestehen hauptsächlich aus den Kunststoffen PE, PS und PVC und sind gekennzeichnet durch einen geschäumten Innenkern und eine kompakte Außenhaut.

Die Schaumstruktur wird bei der Verarbeitung durch Zumischung eines chemischen Treibmittels (z.B. Azodicarbonamid) erzeugt, das sich bei der Verarbeitungstemperatur zersetzt.

Das Extrudieren besteht aus den Prozeßschritten:

- Fördern,
- Verdichten,
- Plastifizieren,
- Homogenisieren.

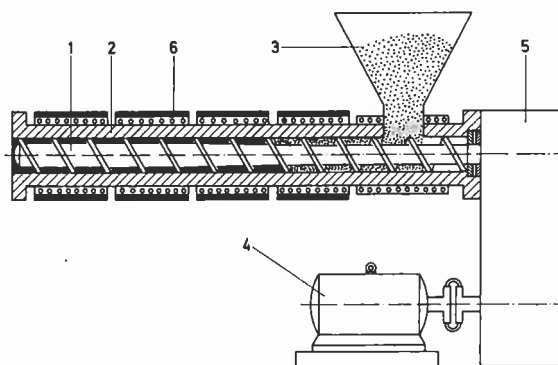
Zur Verdichtung der pulver- oder granulatförmigen Kunststoffmasse wird i.d.R. ein in mehrere Zonen unterteilter Schneckenverdichter eingesetzt (Bild 7.9). Die Materialförderung des Feststoffes erfolgt im Einschneckenextruder aufgrund der Reibungskräfte zwischen Kunststoffformmasse, Zylinderwand und Schnecke. Die Förderung ist umso besser, je kleiner der Reibungskoeffizient zwischen Schnecke und Kunststoff einerseits und je größer der Reibungskoeffizient zwischen Zylinderwand und Kunststoff andererseits ist.

Schnecke und Zylinder bilden zusammen die Plastifiziereinheit. Durch den Kontakt mit der heißen Zylinderwand erwärmt sich der Kunststoff und beginnt zu schmelzen. Am Ende des Schneckenzylinders ist das wassergekühlte Werkzeug befestigt, in dem die heiße Kunststoffmasse unter hohem Druck ausgeformt wird.

Die im Granulat- bzw. Pulverhaufwerk vorhandenen Lufteinschlüsse müssen, bevor die Kunststoffformmasse vollkommen aufgeschmolzen ist, herausgedrückt oder über Zylinderbohrungen abgesaugt werden.

Extruder werden hauptsächlich für die Herstellung von Flachfolien sowie für die Ummantelung von Werkstoffen, z.B. Kabel "und Drähte", eingesetzt. Zum Extrudieren eignen sich die Kunststoffe PE, PP und PVC [40,130].

Bild 7.9 Herstellung von Formteilen im Einschneckenextruder



- | | |
|------------|------------|
| 1 Schnecke | 4 Motor |
| 2 Zylinder | 5 Getriebe |
| 3 Trichter | 6 Heizung |

7.4.3 Schäumen

Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste können über den flüssigen oder zähflüssigen Zustand durch Begasung in Schäume umgewandelt werden. Die mengenmäßig wichtigsten Kunststoffe für das Schäumen sind Polyurethan und Polystyrol. Diese finden als Isolierung und Verpackung Anwendung. PUR wird auch in der Polsterindustrie eingesetzt.

Bei den zum Schäumen verwendeten Treibmitteln wird nach chemisch und physikalisch wirksamen Substanzen unterschieden. In der Regel sind außerdem Stabilisatoren erforderlich.

Als physikalische Treibmittel kommen hauptsächlich Pentan und fluorierte Kohlenwasserstoffe zur Anwendung.

Chemische Treibmittel benötigen zur Gasbildung höhere Temperaturen, die nur bei der Verarbeitung von Thermoplastschmelzen erreicht werden. Beispielsweise wird bei der Reaktion von Isocyanat mit Wasser Kohlendioxid frei, das als Treibmittel wirkt.

7.4.4 Spritzgießen

Beim Spritzgießverfahren werden Kunststoffe als Rohmaterial in Form von Granulat, Profilsträngen oder Pulver eingesetzt. Mit dem Verfahren können sowohl Thermoplaste als auch Duroplaste und Elastomere verarbeitet werden.

Die Verarbeitung von Kunststoffen über den Weg des Plastifizierens und Homogenisierens in einem Innenmischer macht auch Materialgemische wie Kunststoffe aus Hausmüll ohne Zusätze verarbeitungsfähig. Um eine Entmischung zu vermeiden, sind Eigenschaften wie Wärmebeständigkeit, Viskosität und Verarbeitungstemperatur der einzelnen Komponenten zu berücksichtigen. Desweiteren dürfen keine größeren, festen Schmutzanteile enthalten sein.

Bei Spritzgußmaschinen wird der Kunststoff in Form von Granulat, Profilsträngen oder Pulver über einen Trichter in den Massezylinder eingefüllt. Mit Hilfe einer Schnecke wird die Kunststoffmasse anschließend durch den beheizten Zylinder bewegt und aufgeschmolzen. Durch Drehen der Schnecke wird die Schmelze verdichtet und unter Druck über eine Düse in ein geschlossenes Werkzeug gepreßt. Im Werkzeug erkaltet die Masse und kann als Fertigteil entformt werden (Bild 7.10).

Die üblichen Verarbeitungstemperaturen beim Spritzgießen liegen zwischen 150 und 300 °C. Festigkeit und Formstabilität der Produkte werden durch Beimischung von Füllstoffen, wie z.B. Glasfasern, Farbstoffen oder Pigmenten, mit einem durchschnittlichen Anteil von 30 % erreicht.

Eine verfahrenstechnische Variante des Spritzgießens stellt das Spritzblasen dar. Spritzblasen bietet

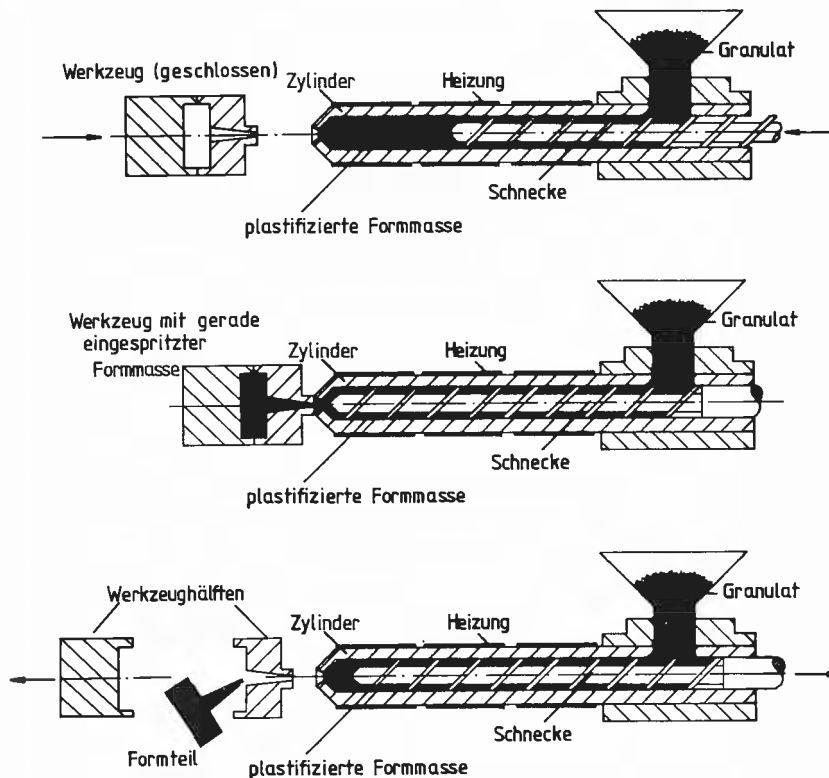


Bild 7.10 Herstellen von Formteilen mittels Spritzguß

den Vorteil, abfallfrei zu fertigen. Hohlkörper (z.B. Flaschen) können im Bereich von Hals und Boden nahtlos hergestellt werden. Beim Spritzblasen wird eine exakte Waddickenverteilung des Materials erreicht [130].

Eine weitere Variante des Spritzgußverfahrens ist das Thermoplast-Schaumgußverfahren (TSG-Verfahren). Hiermit können Spritzgußteile großer Abmessungen mit geringem spezifischen Gewicht hergestellt werden. Der wesentliche Unterschied zum Spritzgußverfahren besteht in der Verwendung von Formmassen, die ein chemisches Treibmittel (z.B. Azodicarbonamid) enthalten. Das TSG-Verfahren bietet die Möglichkeit der Zweikomponentenverarbeitung. Im Kern weisen die Formteile eine Schaumstruktur auf, die zur Oberfläche hin von einer weitgehend kompakten, ungeschäumten und glatten Außenhaut umschlossen wird. Der Kern kann aus preiswertem Recyclingmaterial (z.B. Kunststoff aus Hausmüll) und die Randschicht aus Neumaterial (PS, PP, PE) bestehen. Diese sogenannten Strukturformteile finden in der Möbelindustrie, Rundfunk- und Phonoindustrie und im Automobilbau Einsatz [40,130].

7.4.5 Pressen

Mit dem Preß-Verfahren können aus Duroplasten Formteile hergestellt werden. Die härtbare Formmasse wird in das Werkzeug eingefüllt und unter Druck bei erhöhter Temperatur ausgehärtet.

Da Duroplaste eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, wird die Formmasse zur Verkürzung der Preßzyklen häufig außerhalb des Werkzeuges erwärmt. Zur besseren Vorwärmung wird die pulverförmige Formmasse zu Tabletten gepreßt. Weitere Vorteile der Tablettenherstellung sind:

- hohe Dosiergenauigkeit,
- Vermeidung von Lufteinschlüssen,
- leichteres Einbringen in die Formwerkzeuge,
- kürzere Preßzyklen,
- Verdichtung voluminöser Grobstrukturmassen.

Die Erwärmung der Tabletten erfolgt meist in Hochfrequenzöfen auf eine Temperatur von ca. 110 °C.

Unter Verwendung von hydraulischen Pressen wird die Preßmasse (Tabletten) anschließend unter Drücken bis zu 3.000 bar in beheizte Stahlformwerkzeuge gepreßt. Während der sogenannten Schließzeit plastifiziert und verteilt sich die Masse gleichmäßig im Werkzeughohlraum.

Durch Vernetzen der Molekülketten bei höherer Temperatur (Härtetemperatur) entsteht ein Duroplast, durch Einfrieren (Abkühlen) der Schmelze ein Thermoplast [130].

7.4.6 Abluftbehandlung

Um bei der Einschmelzung von Kunststoffen ein möglichst gleichmäßiges, homogenes Plastifikat zu erhalten, sollte die Arbeitstemperatur des Plastifikators der Erweichungstemperatur der thermisch stabilsten Kunststofffraktion entsprechen [23].

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 7.2 aufgeführten

Tabelle 7.2 Plastifizierungstemperaturen verschiedener Kunststoffe [23]

Kunststoffarten	Erweichung [°C]	Verflüssigung [°C]
PVC	100 – 150	130 – 190
PE	105 – 130	140 – 200
PS	80 – 90	140 – 160

ten Plastifizierungstemperaturen zeigt sich, daß selbst beim Einsatz von weitgehend sortenreinen Altkunststoffen Schwierigkeiten bei der Plastifizierung entstehen. Da bestimmte Anteile der Kunststofffraktion bereits bei geringeren Temperaturen als der erforderlichen Arbeitstemperatur plastifizieren, können diese der thermischen Zersetzung unterliegen. Noch stärker ist dieser Aspekt beim Einsatz von gemischten Kunststoffen zu berücksichtigen.

Da Kunststoffe eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen, führt selbst bei einem dünnen Knetfilm der Temperaturgradient innerhalb des Plastifikats zu überhöhten Temperaturen an den Wärmeübergangsgrenzen vom heißen Plastifikator zum Plastifikat. Dadurch werden Crackprozesse unterstützt.

Die Crackprodukte liegen in der flüssigen, dampfförmigen oder gasförmigen Phase vor. Um eine Beeinträchtigung des Bedienungspersonals und der Umwelt zu vermeiden, müssen die Crackprodukte kontinuierlich aus dem Plastifikator abgesaugt und einer chemischen und physikalischen Behandlung zugeführt werden.

Bei der Behandlung der abgesaugten Abluft muß die Arbeitstemperatur des Plastifikators, die je nach Kunststoffart bei 150 bis 230 °C liegen kann, berücksichtigt werden. Dies bedeutet, daß flüssige Anteile sich bei Abkühlung auf eine Ablufttemperatur von 20 bis 35 °C verfestigen und gasförmige Anteile sich zumindest teilweise verflüssigen können. Die Abscheidung dieser Crackprodukte stellt ein weniger großes Problem dar, da diese der Abluft auf physikalischem Wege entzogen werden können. Das Hauptproblem ist die Abscheidung der selbst bei Abkühlung gasförmig verbleibenden Crackprodukte.

7.4.6.1 Chemische Grundlagen der Abluftbehandlung

Bei den gasförmigen Crackprodukten muß davon ausgegangen werden, daß diese als Monomere oder niedermolekulare Teilpolymere vorliegen.

Diese Monomere lassen sich durch eine Doppelbindung im Molekül charakterisieren. Hiermit besteht die Möglichkeit für die chemische Umsetzung der Monomere mit Oxidationsmitteln. Die chemische Reaktion sollte als Produkte Aldehyde bzw. Ketone oder Säuren aufweisen, d.h. die ursprünglich gasförmigen Monomere sollen zu flüssigen und/oder in Wasser oder Alkalien löslichen Säuren umgewandelt werden.

Auch niedermolekulare, bei der Arbeitstemperatur der Abluftbehandlungsanlage gasförmig vorliegende Teilpolymere lassen sich je nach Polymerisationsgrad

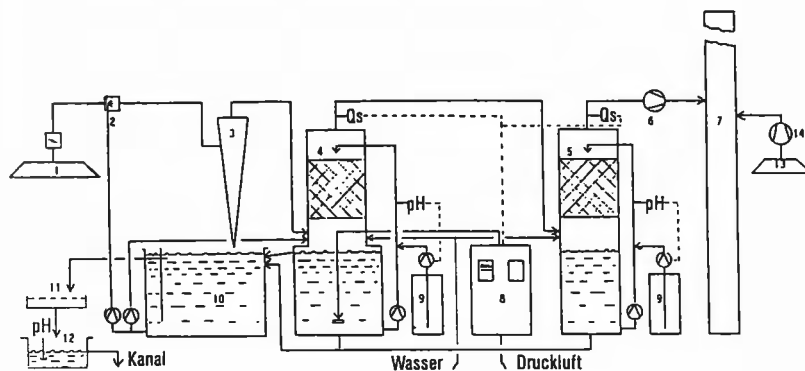


Bild 7.11 Verfahrensbeispiel einer Abluftbehandlung [23]

- | | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 Abluftsaugung | 6 Abluftventilator | 11 Filteranlage |
| 2 Vorwaschdüse | 7 Schornstein | 12 pH-Wert Endkontrolle |
| 3 Zyklon | 8 Ozonerzeuger | 13 Hallenabsaugung |
| 4 Wäscher | 9 Säure- und Laugenbehälter | 14 Abluftventilator |
| 5 Wäscher II | 10 Schlammseider | |

nach diesem Verfahren oxidieren, also zur Säure umsetzen.

Ist die Polymerisation jedoch schon so weit fortgeschritten, daß eine Oxidation zur Säure nicht mehr möglich ist, kann durch weitgehende Oxidation mit Sauerstoff ein Übergang in die Flüssigphase erreicht werden.

Das zur Abluftbehandlung eingesetzte Oxidationsmittel (Ozon) muß dementsprechend ein Oxidationspotential besitzen, das die Oxidation der Monomere zu Aldehyden, Ketonen und Säuren ermöglicht sowie gleichzeitig Sauerstoff zur Einleitung einer Polymerisation zur Verfügung stellt.

7.4.6.2 Verfahrensbeschreibung

Das Verfahrensschema einer beispielhaft ausgeführten Abluftreinigungsanlage besteht aus folgenden Prozeßschritten (Bild 7.11):

- Auswaschen von Feststoffen,
- Kondensieren und Auswaschen dampfförmiger und gasförmiger Inhaltsstoffe,
- Oxidieren und Auswaschen flüssiger und gasförmiger Inhaltsstoffe,
- Austragung der abgeschiedenen bzw. im Waschmedium aufgenommenen Stoffe,
- Vorbehandlung des verworfenen Waschmediums.

Abscheidung von Feststoffen und saure Wäsche

Da sich bei der thermischen Zersetzung von Thermoplasten in Gegenwart von Sauerstoff und Wasserdampf Säuren bilden, bietet sich zur Auswaschung der Feststoffe ein alkalisches Waschmedium (Natriumlauge) an.

Durch den Wasserkontakt und die Zumischung von Umgebungsluft tritt eine Abkühlung der Plastifikatorabgase und damit eine Kondensation gas- und dampfförmiger Abluftinhaltsstoffe ein.

Um eine Verschmutzung der Abgasleitungen möglichst zu vermeiden, erfolgt die Auswaschung der Feststoffe sowie der kondensierten Flüssiganteile bereits in der Absaugstrecke. Ein Zyklon trennt Flüssigkeit und Feststoffe vom Abluftstrom.

Die Waschflüssigkeit wird nach Abtrennung von Feststoffen sowie lipophilen Kondensaten im Kreislauf geführt.

Oxidation durch Ozon

Dem Zyklon ist ein Gegenstromwäscher nachgeschaltet, in dem weitere Kondensate abgeschieden werden. Gleichzeitig dient der Gegenstromwäscher als Reaktor für die Oxidation und das Auswaschen der dabei entstehenden Reaktionsprodukte.

Das als Oxidationsmittel eingesetzte Ozon wird durch Einleiten ozonhaltiger Luft bis zum Löslichkeitsprodukt im Waschmedium gelöst. Das ozonisierte Waschmedium wird im Wäscher im Gegenstrom zur Abluft geführt. Füllkörper bewirken eine intensive Verteilung der im Gegenstrom zur Abluft geführten und über Düsen erzeugten Flüssigkeitstropfen des Waschmediums. Damit wird der Abluft eine möglichst große reaktive Oberfläche geboten und ein optimaler Kontakt zwischen Abluft und Waschmedium erreicht. Die Oxidationsreaktionen laufen an der Grenzfläche Waschmedium/Luft ab, wobei die Reaktionsprodukte vom Waschmedium aufgenommen werden.

Eine Oxidation der Crackprodukte bis zur Säure kann nur erreicht werden, wenn die entstehende Säure kontinuierlich neutralisiert wird. Deshalb wird das Waschmedium mit Natronlauge alkalisiert.

Um sowohl die notwendige Reaktionszeit für die Ozonsättigung des Waschwassers, als auch für die in der Flüssigkeitsphase ablaufenden Reaktionen sicherzustellen, ist der Wäschersumpf mit speziellen Einbauten versehen.

Der im Wäschersumpf durch Oxidation auftretende Ozonverbrauch wird durch die kontinuierliche Ozonsättigung des Waschmediums ausgeglichen. Überschüssiges Ozon wird mit der Abluft im Gegenstrom zum Waschmedium geführt und stellt so sicher, daß an den reaktiven Grenzflächen Waschmedium/Luft ausreichend Oxidationsmittel zur Verfügung steht.

Die Alkalisierung des Waschmediums erfolgt durch bedarfsabhängige Zudosierung von Natronlauge. Die Steuerung der Dosierung übernimmt eine pH-Wert

Meß- und Regelstrecke. Da Natronlauge praktisch nicht mit Ozon reagiert, wird der Natronlaugebedarf auf die Menge begrenzt, die zur Neutralisation saurer Abluftinhaltsstoffe und saurer Reaktionsprodukte notwendig ist.

Die trotz der Vorreinigung im Wäscher abgeschiedenen sowie die durch Reaktionen im Wäscher gebildeten Feststoffe und hydrophoben Flüssigprodukte werden durch das in das Waschmedium eingeleitete Ozon/Luftgemisch zum Aufschwimmen gebracht und über die Oberfläche des Wäschersumpfes kontinuierlich ausgeschwemmt. Die eigentliche Trennung vom Waschmedium erfolgt in einem Beruhigungsbecken.

Werden die Wässer aus dem Beruhigungsbecken für die erste und zweite Verfahrensstufe in einem Becken zusammengefaßt, erfolgt durch die ständige Vermischung der Flüssigkeitsströme aus beiden Verfahrensstufen gleichzeitig die Alkalisierung des Waschmediums aus der ersten Verfahrensstufe.

Alkalische Wäsche

Als dritte Verfahrensstufe dient ein Gegenstromwäscher mit saurem Waschmedium. Der Gegenstromwäscher arbeitet nach demselben Grundprinzip wie der Wäscher der Verfahrensstufe zwei und dient der Auswaschung eventuell in der Abluft enthaltener alkalischer Bestandteile und Reaktionsprodukte. Dies wird vorwiegend dann der Fall sein, wenn als Rohprodukte für den Recyclingprozess Polyamine und/oder Polyamide eingesetzt werden.

Die Ansäuerung des Waschmediums erfolgt durch bedarfsabhängige Zudosierung von Schwefelsäure. Da das Sulfation der Schwefelsäure in der höchsten Oxidationsstufe vorliegt, findet zwischen Schwefelsäure und in diese Waschstufe eingetragenes Ozon, keine Reaktion statt.

Abwasserbehandlung

Der Entsorgung der im Beruhigungsbecken von den Waschmedien abgeschiedenen Feststoffe und nicht wassermischbaren Flüssigkeiten dient eine Abwasservorbehandlungsanlage.

Wie bereits beschrieben, ist das Beruhigungsbecken alkalisch eingestellt. Dadurch werden die über die Abluft in die Waschwässer gelangenden Schwermetalle als Hydroxide ausgefällt und abgeschieden. Diese Schwermetalle können vorwiegend in Druckfarben und Pigmenten in den Kunststoffen enthalten sein und damit in den Recyclingprozeß gelangen.

Durch Kondensation und Reaktion entstandene, nicht wassermischbare Flüssigkeiten werden von Feststoffen absorbiert, die in den Waschwässern in größerer Menge enthalten sind und aus Staubpartikeln und Reaktionsprodukten bestehen. Die Absorption wird durch die große Oberfläche, insbesondere der Staubpartikel, unterstützt.

Im Beruhigungsbecken liegt der größte Teil der Feststoffe einschließlich der absorbierten Flüssigkeiten vergleichbar einer Flotation als Schwimmschlamm vor, der über eine Überlaufrinne aus dem Beruhigungsbecken abgezogen und in eine Schlammvorlage überführt wird.

Aus der Schlammvorlage wird der Dünnschlamm zur Schwerkraftfiltration auf ein Bandfilter gepumpt und eingedickt. Die Filtration erfolgt als reine Schwerkraftfiltration, so daß die vom Schlamm absorbierten, nicht wassermischbaren Flüssigkeiten nicht mit abgetrennt werden, sondern in der Schlammphase verbleiben. Der entwässerte Schlamm wird entsorgt.

Das von Feststoffen befreite Abwasser wird über eine pH-Wert-Endkontrolle der Kanalisation zugeleitet und dient gleichzeitig der Absalzung der Washkreisläufe.

Die Absalzung der Verfahrensstufe drei erfolgt diskontinuierlich manuell. Der abgeführte Teil des im Kreislauf befindlichen Waschwassers wird über das ständig mit alkalischem Wasser gefüllte Beruhigungsbecken abgezogen.

7.5 Pyrolyse

Die Pyrolyse (Entgasung) stellt die thermische Zersetzung von organischem Material unter Ausschluß eines Vergasungsmittels (Sauerstoff, Luft, CO₂ etc.) dar. Dabei werden flüchtige Stoffe bei Temperaturen zwischen 150 und 900 °C ausgetrieben.

Die Wiederverwertung von Kunststoffabfällen durch einen pyrolytischen Abbau beinhaltet die Spaltung der Makromoleküle in

- Pyrolyseruß oder -koks,
- Pyrolyseöl,
- Pyrolysegas (heizwertreiches Brenngas),
- Wasser (nach Kondensation aus dem Pyrolysegas).

Dabei beeinflussen Einsatzstoffe und Prozeßführung die Zersetzungsprodukte. Die Pyrolyseprodukte können entweder als Brennstoffe oder als Chemierohstoffe genutzt werden.

Zum Teil wird Kunststoff gemeinsam mit Hausmüll pyrolysiert. Die größte Pyrolyse-Abfallbeseitigungsanlage in Deutschland (Durchsatz etwa 30.000 Mg/Jahr) wird nach dem PKA-Verfahren (Pyrolyse-Kraftanlagen GmbH, Aalen) betrieben. Die Anlage ist zur Erzeugung von Heizgas ausgelegt.

Zwei Pyrolyse-Anlagen, die mit Drehrohröfen arbeiten, stehen in Salzgitter und in Bochum. Die Versuchsanlage der Mannesmann-Veba-Umwelttechnik (MVU) in Bochum lieferte neben Pyrolysegas auch verkaufsfähigen Ruß.

Die erste Wirbelschicht-Anlage in kommerzieller Größenordnung zur Verwertung von Altreifen und Kunststoffen wurde von der Deutschen Reifen- und Kunststoff-Pyrolyse GmbH (DRP), Hamburg in Ebenhausen bei Ingolstadt errichtet und im September 1986 von der Asea Brown Boveri (ABB), Mannheim übernommen. Das Verfahrenskonzept der Anlage stützte sich maßgeblich auf die Entwicklungsarbeiten der Universität Hamburg. Ende 1989 wurde die Anlage stillgelegt (s. Kapitel 5.5.3).

7.5.1 Produkte und Eigenschaften

Bei der pyrolytischen Behandlung werden die Kunststoffe im Temperaturbereich zwischen 300 und 350 °C in C₂₅- bis C₄₀-Aliphate (langkettige Moleküle

mit 25 – 40 Kohlenstoffatomen) gecrackt. Bei einer Temperaturerhöhung auf 700 bis 800 °C in der Schmelze erfolgt ein weiteres Cracken in C₂- bis C₆-Olefine, die bei hoher Konzentration und Temperatur unter Methan- und Wasserstoffabspaltung zu Aromaten reagieren [58].

7.5.1.1 Pyrolyseruß oder -koks

Als Feststoffe aus der Pyrolyse von Kunststoffen fallen insbesondere Ruß oder Koks, Wirbelsand (beim Wirbelschichtverfahren) und Füllstoffe, wie z.B. Metallverbindungen, an.

Der Feststoffgehalt schwankt je nach eingebrachtem Material zwischen 1 und 43 %.

Bei der Pyrolyse einer Kunststoffmischung aus Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol im Verhältnis 3 : 1 : 1 (entsprechend der Zusammensetzung dieser Kunststoffe im Hausmüll) fallen zwischen 1 und 3 % Ruß an; bei der Altreifenpyrolyse beträgt die Rußausbeute ca. 40 %.

Tabelle 7.3 Zusammensetzung und Eigenschaften der niedersiedenden Pyrolyseölfraction [49]

Benzol-, Toluol-, Xylol-Aromaten	Gew.-%	60 – 70
Naphthalin + Methylnaphthaline	Gew.-%	10 – 15
Siedeverlauf:		
Siedebeginn	°C	30 – 70
Siedeende	°C	200 – 250
Dichte	kg/m ³	800 – 900
Mischoktanzahl:		80 – 100 95 – 110
Organisches Chlor:	ppm	0,3
Anorganisches Chlor:	mg/l	30

7.5.1.2 Pyrolyseöl

Die Ausbeute an Pyrolyseöl kann zwischen 40 und 60% des eingebrachten Materials betragen. Das Pyrolyseöl entspricht einer Mischung aus Leichtbenzin und Steinkohleteer und besteht zu 95 % aus Aromaten. In einer Destillationskolonne kann das Öl in eine nieder- und eine hochsiedende Fraktion getrennt werden (Tabellen 7.3 und 7.4). Die Qualität des Pyrolyseöls ergibt sich aus dem Restanteil organisch gebundenen Chlors. Für die Verarbeitung in petrochemischen Anlagen sollte dieser Wert nicht über 10 ppm liegen. Bei der Pyrolyse von Kunststoffmischungen werden Öle gewonnen, die 0,3 – 5 ppm organisch gebundenes Chlor enthalten.

In der niedersiedenden Fraktion bildet Benzol mit 30 – 50 % die Hauptkomponente. Daneben treten Toluol, Xylol und leichter siedende Fraktionen auf. Aus der hochsiedenden Fraktion kann mit ca. 25 % die Hauptkomponente Naphthalin gewonnen werden. Ein wesentlicher Einsatzbereich hierfür ist der Kraftstoffsek-

Tabelle 7.4 Zusammensetzung und Eigenschaften der hochsiedenden Pyrolysefraktion [49]

Benzol, Toluol, Xylol-Aromaten	Gew.-%	5
Naphthalin + Methylnaphthaline	Gew.-%	20 – 30
Gaschromat. erfaßbare Anteile	Gew.-%	70
Extraktionsrückstand:	Gew.-%	6 – 10
Dichte:	kg/m ³	1000 – 1200
Asche:	Gew.-%	10
Organisches Chlor:	ppm	5
Anorganisches Chlor:	mg/l	1000 – 2000

tor, wobei Pyrolysebenzine zur Oktanzahlerhöhung eingesetzt werden. Die Aufbereitung der niedersiedenden Fraktion zu chemischen Reinstoffen (Toluol, Benzol etc.) ist nicht wirtschaftlich [49,58].

7.5.1.3 Pyrolysegas

Bezogen auf die Einsatzmenge lassen sich aus Kunststoffabfällen 35 – 60 % Gas erzeugen. Das Pyrolysegas besteht hauptsächlich aus Methan, Ethan, Ethen und Propan. Mit einem Heizwert von ca. 35.000 kJ/m³ (Tabelle 7.5), hat es Erdgasqualität und kann zur Energieerzeugung genutzt werden.

Bei Einsatz von Altreifen beträgt der Gasanteil 15 – 30 %. Bei der Pyrolyse von Altreifen treten neben den Hauptkomponenten Oxidationsprodukte wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasser auf, die durch die Zersetzung der Textilien im Altreifen entstehen [49,58,141].

Das Einschmelzen könnte neben der Abgasreduzierung einer der entscheidenden Vorteile der Pyrolyse sein. Die Rückstandsbehandlung kommt in der TA Abfall eine besondere Bedeutung zu. Für die Rück-

Tabelle 7.5 Beispiel einer Zusammensetzung des Pyrolysegases aus Kunststoffen [58]

Parameter	Anteil in	
	[Gew.-%]	[Vol.-%]
Wasserstoff	2,2	18,8
Kohlendioxid	4,8	1,9
Kohlenmonoxid	9,4	5,7
Methan	54,5	58,2
Ethan	5,2	3,0
Ethen	16,7	10,2
Propan	0,2	0,1
Propen	2,9	1,2
Butadien	1,2	0,4
Benzol-, Toluol-, Xylol-Aromaten	2,7	0,5
Mittlere Dichte	0,764 kg/m ³	
Mittlerer Heizwert	34 554 kJ/m ³ = 9,6 kWh/m ³	

stände aus thermischen Behandlungsanlagen wurden eine Begrenzung des Glühverlustes eingeführt, bei dessen Überschreitung eine Ablagerung nicht mehr möglich ist.

Durch Zugabe von Calciumoxid in die Wirbelschicht kann der bei der Pyrolyse von PVC erzeugte Chlorwasserstoff gebunden werden. Kunststoffe aus der getrennten Sammlung weisen ca. 15 Gew. % PVC auf. Die Produkte sind frei von Chlorwasserstoffgasen und Korrosionsschäden im Reaktor werden vermieden [49,58]. Damit wird die Bildung von Calciumchlorid, das bei hohen Temperaturen die Wirbelschicht verklebt, unterbunden. An der Universität Hamburg wird z.Zt. versucht, das HCl-Gas in einer Vorabspaltung bei Temperaturen von 300 – 400 °C abzuspalten, ohne daß bereits umfangreiche Crackvorgänge ablaufen. Das trockene HCl-Gas könnte dann genutzt werden [61].

7.5.2 Pyrolyse verschiedener Altkunststoffe

Auf der Suche nach Anwendungsgebieten der Pyrolyse wurden Versuche mit verschiedenen Abfallstoffen unternommen [141]. Der überwiegende Teil der nachfolgenden Ergebnisse (Kapitel 5.5.2.1 bis 5.5.2.4) wurde in der Wirbelschicht-Pyrolyse-Anlage der Universität Hamburg unter Prof.-Dr. Kaminsky erarbeitet.

Kernstück der Versuchs- oder Technikums-Pyrolyseanlage für Kunststoffabfälle an der Universität in Hamburg im Institut für technische und makromolekulare Chemie, ist ein Wirbelschichtreaktor mit einem Innendurchmesser von 450 mm (s. Bild 7.12) Zur Pyrolyse des durch eine Schnecke oder Schleuse einge-

brachten Kunststoffes dient ein Hilfswirbelbett aus Quarzsand bei einer Temperatur zwischen 600 und 900 °C. Als Wirbelgas wird ein auf ca. 400 °C vorgewärmtes Pyrolysegas benutzt. Die Wärmezufuhr erfolgt indirekt durch Strahlheizrohre, in denen Pyrolysegas verbrannt und die Abgase aus dem Reaktor in einen Wärmetauscher geleitet werden.

Das durch die Pyrolyse gebildete Spaltgas verläßt den Reaktor und wird in einem Zyklon von Feinstaub und Ruß befreit und in einem Quenchkühler durch Umpumpen eines Produktöles auf Raumtemperatur abgekühlt. Anschließend durchläuft das Gas zwei Quenchkolonnen, die mit Glaskörpern gefüllt sind.

Die dabei abgeschiedenen Öle werden in zwei Destillationskolonnen aufgetrennt, wobei eine Fraktion im Siedebereich von 150 - 170 °C (überwiegend Xylol) als Quenchflüssigkeit benutzt wird. Daneben wird ein hochsiedender Teer, eine toluol- und eine benzolreiche Fraktion gewonnen.

Das von flüssigen Produkten weitgehend befreite Gas wird in einem Elektrofilter gereinigt, von fünf parallel geschalteten Membrankompressoren auf 2 bis 3 bar verdichtet und in drei Gasometern von je 0,5 m³ Inhalt gespeichert. Ein Teil des Gases wird in den Strahlheizrohren verbrannt, ein anderer dient, vorgewärmt durch die heißen Brennergase im Wärmetauscher, zur Fluidisierung der Schicht. Das Überschußgas wird abgefackelt [61].

7.5.2.1 Sortenreine Kunststoffabfälle

An der Universität Hamburg wurde als Einsatzmaterial Polyethylen und Polypropylen verwendet. In Tabelle

Bild 7.12 Fließschema der Technikumsanlage zur Pyrolyse von Kunststoffabfällen nach dem Hamburger Verfahren, Kapazität 20 bis 40 kg/h [61]

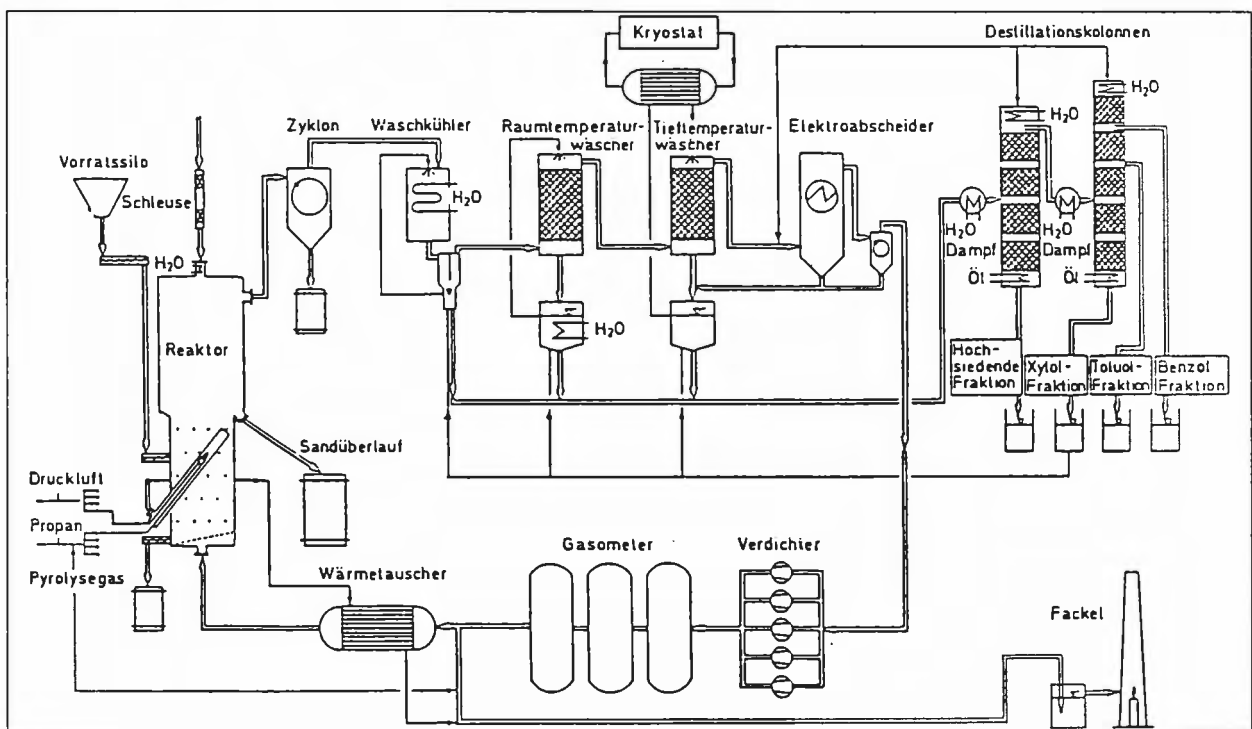


Tabelle 7.6 Pyrolyseprodukte bei Einsatz von Kunststoffabfällen aus der Hausmüllsortierung, Shredderleichtfraktion aus der Autoverwertung und Altreifen [61]

Einsatzmaterial	Polyethylen [Gew.-%]	Kunststoffabfälle [Gew.-%]	Shredderleicht- fraktion [Gew.-%]	Altreifen [Gew.-%]
Pyrolysetemperatur	780 °C	790 °C	700 °C	720 °C
Gase	51,2	43,7	26,8	21,8
Methan	19,8	0,6	0,3	0,7
Ethen	19,7	11,4	3,2	1,8
Ethan	4,3	3,9	1,9	2,4
Propen	4,4	1,8	1,9	0,4
Kohlendioxid	—	2,0	4,1	1,5
Kohlenmonoxid	—	3,9	7,2	1,5
Schwefelwasserstoff	—	—	—	0,01
Öl	46,2	26,3	21,4	21,0
Benzol	23,9	12,4	4,1	2,6
Toluol	5,9	3,8	4,4	2,6
Naphthalin	3,7	2,4	0,9	0,5
Benzonitril	—	—	0,8	—
Rußöle	7,2	4,0	6,2	11,5
Wasser	—	4,6	1,5	0,8
Ruß, Füllstoffe	1,8	25,4	50,3	35,5
Stahlcord	—	—	—	13,7

7.7 sind die gaschromatographisch ermittelten Analysen des Rohgases in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei der Pyrolyse von PE und einer Temperatur von 720 °C dargestellt. Die Hauptkomponenten bilden Methan mit über 30 %, Ethen mit ca. 28 %, sowie Ethan und Propen mit je 7 %. Wird der Wäscher, wie bei diesem Versuch, bei 20 °C betrieben, kann Benzol im Rohgas auf fast 15 % angereichert werden.

Als weitere Aromaten sind Toluol, Ethylbenzol, Xylol und Styrol im Gas enthalten [59].

Der Gasanteil liegt bei Temperaturen im Bereich von 650 °C bis 820 °C zwischen 50 % und 60 %. Der Rußanteil nimmt von 1,75 % bei 740 °C auf 4,55 Gew.-% bei 820 °C zu.

Es lassen sich bis zu 46 % Flüssigkeiten (Pyrolyseöle) erzeugen, wovon 43 % Aromaten sind.

7.5.2.2 Gemischte Kunststoffabfälle

Bei der Pyrolyse von gemischten Kunststoffen an der Universität Hamburg wurde eine Mischung aus PE, PP und PS entsprechend einer Kunststofffraktion im Hausmüll eingesetzt.

Die Zusammensetzung des Gases unterschied sich kaum von dem Gas, das bei der Pyrolyse von Polyethylen mit Polypropylen gewonnen wurde. Den Hauptanteil der niedermolekularen Produkte bildete Methan, Ethan, Ethen und Propen, der flüssigen Produkte Benzol, Toluol, Styrol und Naphthalin.

Komponenten	Zeit in [h]				
	0,5	3,0	5,5	8,0	11,5
Wasserstoff	0,31	1,13	1,80	1,80	1,84
Methan	4,31	14,54	29,40	34,80	32,94
Ethen	12,12	22,64	28,39	26,69	27,55
Ethan	2,77	5,33	7,00	7,00	7,04
Propen	16,44	13,01	9,80	7,00	7,04
Propan	0,92	0,92	0,80	0,50	0,61
Buten-1	4,62	0,92	0,40	0,20	—
Butadien	3,70	2,05	2,10	1,80	1,94
Buten-2, Butin	—	—	—	—	—
Pentene, Hexene	14,07	4,71	3,70	2,60	3,26
Stickstoff	39,06	30,32	0,90	—	—
Benzol	—	2,46	13,50	14,70	14,59
Toluol	0,04	0,92	1,60	2,20	2,55
Ethylbenzol	0,72	0,81	0,20	0,30	0,31
Xylol	0,82	0,51	0,40	0,40	0,31
Styrol	0,10	0,03	0,01	0,01	0,02

Tabelle 7.7 Rohgasanalyse bei der Pyrolyse von PE bei 720 °C in Abhängigkeit von der Pyrolysedauer [59] in [Gew.-%]

Der Anteil der flüssigen Produkte liegt bei ca. 47 %, der Anteil der gasförmigen Produkte bei rund 51 % [49,58].

7.5.2.3 Verunreinigte Kunststoffabfälle

Bei einer Versuchsreihe mit verunreinigten Kunststoffabfällen wurden in der Technikumsanlage in Hamburg Einwegspritzen, bestehend aus PP, PE Elastomeren wie Kautschuk sowie Nebenbestandteilen, wie Cellophan, Zellstoff und Farbstoffanteilen pyrolysiert.

Es ergab sich eine ähnliche Zusammensetzung des Gases und flüssigen Produkte wie bei der Pyrolyse einer PE/PP-Mischung, wobei rund 37 % Flüssigkeiten und 5,8 % Pyrolyseruß, ein vergleichsweise hoher Anteil, entstanden sind [49,58].

7.5.2.4 Altreifen

Die Hamburger Technikums-Anlage wurde im Dezember 1978 in Betrieb genommen und ist einschließlich der An- und Abfahrzeiten ca. 1.000 Stunden gelaufen. Durch die Pyrolyse von insgesamt mehr als 4.500 kg unzerkleinerter Autoreifen in mehreren Versuchsserien konnte gezeigt werden, daß bis zu 120 kg/h unzerkleinerte Altreifen und andere Materialien bis zu einem Maximalgewicht von 20 kg (kleine LKW-Reifen) bei Temperaturen oberhalb von 650 °C vollständig innerhalb von 1,5 bis 4 Minuten pyrolysiert werden und daß das erzeugte Pyrolysegas ausreicht, um damit den Reaktor autotherm zu beheizen.

Bei der Pyrolyse von Altreifen werden etwa 15 – 20 % Pyrolysegas, 20 bis 30 % Pyrolyseöl und - entsprechend des hohen Füllstoffanteils, wie Ruß, Zinkoxid im Reifen und Siliciumoxid – ca. 40 % Ruß bzw. Koks gebildet. Zusätzlich fallen 5 – 20 % Stahlcord-einlagen als Feststoff und Restmengen an Wasser an.

Das Pyrolyseöl setzt sich aus aromatischen Kohlenwasserstoffen, vor allem Benzol, Toluol und Naphthalin, zusammen, die in verschiedene Fraktionen getrennt werden können.

Der Schwefel aus den Reifen, der aus den Vulkanisierungsprozessen stammt und im Durchschnitt etwa 2 % des Kunststoffanteiles ausmacht, gelangt zum größten Teil gebunden an Zink und Cadmium in den Ruß.

Zur Erzeugung eines verkaufsfähigen Produktes muß der rückgewonnene Ruß speziellen Raffinationsverfahren und einer Aktivierung zur Vergrößerung der inneren Oberfläche unterzogen werden [58,59,141].

7.5.3 Pyrolyseanlage ABB

Die Asea Brown Boveri AG (ABB), Mannheim, hatte im September 1986 die Anlage in Ebenhausen nach dem Hamburger Modell mit einem Durchsatz von 5.000 Mg/a und dem Ziel übernommen, die Kunststoffstraße der Anlage zu sanieren und in einem einjährigen Demonstrationsbetrieb die Umweltverträglichkeit des Verfahrens und die Verfügbarkeit der An-

lage nachzuweisen. Das Vorhaben wurde durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) und den Verband Kunststoffherzeugende Industrie (VKE) gefördert und unterstützt.

Es handelte sich bei dem Verfahren um eine Mitteltemperatur-Pyrolyse. Da das Zielprodukt der Pyrolyse die niedersiedende Fraktion mit hohem Benzol-, Toluol- und Xylolgehalt ist (BTX-Fraktion), lag die Wirbelbettemperatur bei 700 - 750 °C.

Im wesentlichen bestand die Anlage aus drei Teilbereichen:

- Pyrolysereaktor mit Ein- und Austragssystem und Beheizung,
- Gasaufbereitung,
- Speichereinrichtungen (Tanks).

Der Wirbelschichtreaktor wurde mit einem Hilfswirbelbett aus Quarzsand durch Mantelstrahlheizrohre indirekt beheizt. Der Kunststoffeintrag erfolgte seitlich durch 2 Schnecken in die Wirbelschicht. Der organische Anteil des Abfalls wurde thermisch gecrackt und verließ den Reaktorkopf als Prozeßgas. Nicht pyrolysierbare Bestandteile konnten über eine Austragschnecke am tiefsten Punkt des Wirbelbettes abgezogen werden. Das heiße Pyrolysegas wurde in einem Zyklon entstaubt und in 2 nachgeschalteten Kühlstufen erst auf ca. 180 °C, dann auf 5 °C abgekühlt. Das Pyrolysegas stand zur Prozeßbeheizung, zur Fluidisierung der Wirbelschicht und z.B. zur Stromerzeugung durch einen Gasmotor zur Verfügung.

Ende 1989 wurde entschieden, die Demonstrationsanlage in Ebenhausen abzuschalten, weil bei den derzeitigen niedrigen Ölpreisen selbst bei Einsatz reiner Kunststoffabfälle kein Gewinn zu erwirtschaften war. Bei Eintrag von Kunststoffabfällen mit erhöhten PVC-Anteilen (über 10 Gew. %), verklebte die Wirbelschicht bei Zugabe von Calciumoxid. Problematisch wurde außerdem die Entsorgung der großen Menge an Calciumchlorid/Calciumhydroxid-Gemisch, das bei der Neutralisation von HCl, welches aus dem PVC abgespalten wird, entsteht (aus 1 Mg PVC werden ca. 1,5 Mg Ca(OH)Cl gebildet) und noch mit anhaftendem Sand und Ruß vermischt ist. Daher zielt der schon erwähnte Vorschlag auf die Vorabspaltung von trockenem HCl-Gas ab. Ohne Kalkzugabe geht die zu deponierende Menge der Wirbelschichtpyrolyse fast auf Null zurück [61].

7.5.4 Partielle Oxidation

Die Pyrolyse von Kunststoffabfällen auf Polyolefinbasis bei Temperaturen zwischen 600 und 850 °C liefert ein Gemisch, das Kohlenwasserstoffe von Methan bis hin zu höheren Aromaten enthält.

Durch Oxidation eines Teils der eingesetzten Kunststoffe, kann die Temperatur auf 1.500 °C erhöht werden, wobei im wesentlichen Methan und ungesättigte C₂-Kohlenwasserstoffe gebildet werden. Es entstehen zu einem geringen Teil Wasser und Kohlenwasserstoffe, ein anderer Teil der Polyolefine wird zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas) umgesetzt.

Die partielle Oxidation von Kunststoffabfällen wurde an der TH Darmstadt im Technikumsmaßstab an zwei Verfahrensvarianten untersucht [20]:

- Spray-Flammen-Verfahren,
- Tauch-Flammen-Verfahren.

Bei dem Spray-Flammen-Verfahren werden verflüssigte Kunststoffabfälle mit einem Kohlenmonoxid-Wasserstoff-Gemisch über eine Düse zu einem Spray zerstäubt. Der aus dem Spray verdampfende Brennstoff vermischt sich in der Brennkammer mit dem unterstöchiometrisch zugeführten Sauerstoff. In Brennernähe findet zuerst die Spaltung der Kunststoffe statt, danach die Pyrolysereaktion des unverbrannten Brennstoffes sowie der bereits gebildeten Verbrennungsprodukte.

Das Tauch-Flammen-Verfahren verfährt ähnlich dem Spray-Flammen Verfahren mit dem Unterschied, daß das Aufgabematerial in geschmolzenem Zustand einem Sumpf zugeführt wird.

Die Produktgaszusammensetzung ist stark abhängig vom Verhältnis Brennstoff zu Sauerstoff (C/O-Verhältnis). Bei den Versuchen konnte festgestellt werden, daß der Methananteil bei der Behandlung von PP von etwa 4 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis von 0,9 auf 9,5 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis von 1,5 ansteigt. Die gleiche Veränderung tritt auch bei Ethen auf, das von etwa 1 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis von 0,9 auf 5 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis von 1,5 ansteigt.

Die Ausbeute an Kohlenwasserstoffen ist abhängig vom Sauerstoffdurchsatz. Mit wachsendem Sauerstoffdurchsatz sinken die Volumenanteile der Kohlenwasserstoffe im Produktgas an, während die von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid steigen [20].

7.5.5 Wirtschaftlichkeit

Ausführliche Wirtschaftlichkeitsberechnungen liegen bislang weder für die Pyrolyse noch für die Verfahren der partiellen Oxidation vor. Im folgenden können daher nur allgemeine Betrachtungen angestellt werden. Das bei der Pyrolyse anfallende Gas (ca. 40 bis 60 %) enthält weitgehend unabhängig von der Art des thermoplastischen Einsatzgutes wertvolle Bestandteile wie Ethen, Propan, Butan, Butadien, deren Anteil allein ca. 50 % der Gasausbeute beträgt. Der Heizwert liegt zwischen 30.000 und 50.000 kJ/m³. Da diese Gase industriell nur mit erheblichem Aufwand hergestellt werden können, liegt es nahe, das Pyrolysegas in die einzelnen Gaskomponenten aufzutrennen. Die Aufbereitung des Pyrolysegasen ist jedoch nur dann wirtschaftlich, wenn für Sammlung und Transport der Kunststoffe nicht mehr als 100,- DM/Mg aufgewendet werden müssen, wie eine Abschätzung der Betriebs- und Kapitalkosten für eine Kunststoff-Pyrolyse-Anlage mit einer Kapazität von 10.000 Mg/a ergab [32,59].

Dies entspricht dem Aufkommen an Kunststoffabfällen (10.000 Mg/a), wenn Entfernungen bis zu 50 km zugrundegelegt werden [32,45]. Bei der Pyrolyse dieser Abfallmengen würden nur ca. 5.000 Mg/a an Gas freigesetzt, so daß eine Auftrennung in Einzelkompo-

nenten im Vergleich zu den industriellen Crackanlagen (500.000 Mg/a) nicht wirtschaftlich wäre. Eine Ausnahme bilden Pyrolyseanlagen, die an bestehende Crackanlagen angeschlossen werden, um direkt in den Aufbereitungsteil der Crackanlage einzuspeisen. Für das Pyrolysegas ließen sich nach einer Aufbereitung zwischen 600 bis über 1.000 DM/Mg erzielen.

Die bei der Pyrolyse entstehenden Öle können zu Petrochemikalien aufgearbeitet werden, die zu einem höheren Rohstoffwert führen als bei der Verwendung der Öle zu Heizzwecken und Treibstoff-Vorprodukten. In Abhängigkeit vom Benzolpreis lassen sich über 600 DM/Mg Pyrolyseöl erzielen.

Der anfallende Pyrolyseruß kann nach einer Aktivierung als Aktivkohle in der Abwasserreinigung, als Verstärkerruß bei der Gummiherstellung oder als Farbpigment in Lacken und Druckfarben eingesetzt werden [59,141].

Nach Angaben von ABB betrug das Investitionsvolumen für eine Pyrolyseanlage mit 15.000 Mg Jahresdurchsatz 30 Mio DM, während die Netto-Beseitigungskosten für Kunststoffabfälle bei ca. 200,- bis 250,- DM/Mg liegen.

7.6 Hydrierung

Neben der Pyrolyse steht die Hydrierung als Verfahren zum Molekularabbau zu gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen zur Verfügung. Als Produkte entstehen wie bei der Pyrolyse Gas, Öl und feste Rückstände. Unter Hydrierung versteht man die Anbindung von Wasserstoff an beliebige Elemente oder Moleküle. Parallel dazu werden Heteroatome, wie Chlor, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel, in ihre Wasserstoffverbindungen überführt. Die Vollständigkeit der Hydrierung ist abhängig von der Temperatur- und Druckhöhe.

Die Verfahren der raffinierenden Hydrierung, mit deren Hilfe Erdölprodukten störende Verunreinigungen entzogen werden und die die Lagerfähigkeit sowie die Qualität als Brennstoff erhöhen, werden als Hydro-treating bezeichnet. Eine große Bedeutung liegt in der Entschwefelung von Heizöl zur Verminderung von SO₂-Emissionen. Hydrotreating findet in Gegenwart von Wasserstoff unter Druck von 25 – 100 bar und einer Temperatur von 270 – 400 °C statt. Vielfach werden Katalysatoren eingesetzt.

Entwicklungsarbeiten zur Hydrierung wurden von der ehemaligen Union Rheinische Braunkohlen Kraftstoff AG in Wesseling in einer ersten Phase, der Laborphase, unter dem Titel „Verminderung der Umweltbelastung durch Hydrierung kohlenstoffhaltiger Abfälle“ seit 1986 durchgeführt und durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie und das Land NRW gefördert. Die Entwicklungsarbeiten werden von der neugegründeten RWE-Gesellschaft für Forschung und Entwicklung fortgeführt. Aufbauend auf die Ergebnisse aus der Laborphase soll eine Anlage im Technikumsmaßstab (Durchsatz 10 kg/h) in nächster Zeit realisiert werden (Stand 6/90). Anschließend soll sich der Betrieb einer Pilotanlage mit einem geplanten Durchsatz von ca. 100 kg Abfallgemisch/h.

Tabelle 7.8 Ausbeute und Rückstand bei der Hydrierung von Kunststoffen [116]

Einsatzstoff	Gasausbeute [Gew.-%]	Ölausbeute [Gew.-%]	Rückstand [Gew.-%]
Ackerfolien	14	82	4
Hartkunststoff aus Hausmüll	14	71	15
Teppichbodenreste	36	50	50
Shredderabfälle	18	49	33

Tabelle 7.9 Chloranteil im Hydrierungsöl [125] nach [76]

Einsatzstoff	Chlorgehalte des Einsatzstoffes	Chlorgehalt des Öles
PCB-haltiges Zweittraffinat	94 ppm ¹	n. n. (PCB)
Kunststoffgemisch („Grüne Tonne“)	3 – 5,5 Gew.-%	20 ppm
Kabelabfall (PE/PVC)	9 Gew.-%	20 ppm
Shredderabfall	3,3 Gew.-%	210 ppm
Gummi/Kautschuk	0,8 Gew.-%	5 ppm

1 Das PCB-haltige Zweittraffinat entstammt der Umsetzung eines definiert mit 1000 ppm PCB (entspr. 470 ppm Chlor) versetzten Altöles an einem Nickel/Molybdän-Festbettkontakt.

Die Hydrierung von zerkleinerten Kunststoffteilen verläuft unter hohen Temperaturen und Drücken. Dabei werden die Makromolekülketten gespalten und die Bruchstellen mit Wasserstoff abgesättigt. Als Katalysatorgift kann z.B. H₂S auftreten. Es besteht eine grundsätzliche Abhängigkeit vom Chlor-, Sauerstoff- und Stickstoffgehalt der Kunststoffe. So wird Rein-PVC durch Hydrierung in Chlorwasserstoff überführt; die Anwesenheit von Chlor führt zu großen Mengen von HCl. Die unerwünschten Produkte ziehen eine aufwendige Gasreinigung und eine schwierige Verwertung der Gasprodukte nach sich. Die anorganischen Ballaststoffe, die durch die Hydrierung nicht umgesetzt werden können, fallen auf dem Rückstandsweg in konzentrierter Form an. Lassen sich die Rückstände nicht weiterverarbeiten, so vermindert sich der benötigte Deponieraum bezogen auf das Einsatzprodukt um bis zu 90 %. Denkbar wäre, die Rückstände nach Elimination des Restgehaltes an Kohlenstoff oder Kohlenwasserstoffen, durch Verbrennung oder Vergasung als Füllstoffe, Farbpigmente oder Additive zu verwenden oder sie einer Metallrückgewinnung zuzuführen [116]. Tabelle 7.8 weist für einige Einsatzstoffe die Ausbeute an Gas und Öl und den Rückstand aus. Tabelle 7.9 zeigt den Chloranteil im Hydrierungsöl.

Tabelle 7.10 Chemische Zusammensetzung der Hydrierprodukte [70]

	Hydrierprodukte	
	PE/PP	Kunststoffgemisch [%]
Methan	1,1	2,8
Σ C ₂ -C ₄ -Kohlenwasserstoffe	6,1	10,6
Aliph. Kohlenwasserstoffe	84,5	58,5
Benzol, Toluol, Xylol	0,4	3,2
Höhere Aromaten	—	—
Produkte > 360 °C	3,6	20,0
Sonstige	3,7	4,8

Löffler [145] führt für einige mögliche Einsatzstoffe die zu erwartende Aufteilung der Produkte auf Gase, Öle und feste Rückstände auf:

7.6.1 Einsatzprodukte

Die Hochdrucktechnologie und der damit verbundene technische Aufwand beschränken den Produkteinsatz. Generell können alle synthetisch organischen Produkte zum Einsatz kommen. Ein gewisser Verschmutzungsgrad ist dabei vernachlässigbar; die Maximalgrenze liegt bei 20 – 30 %. Diesen Ballast, der nicht zum gewünschten Produkt führt, beinhalten insbesondere Füllstoffe, Fremdstoffanteile in Verbundwerkstoffen u.a. Kunststofffraktionen aus der getrennten Hausmüllsammlung eignen sich recht gut als Einsatzstoffe, möglich ist aber auch der Einsatz gemischter Kunststoff- oder Shredderabfälle der Automobilindustrie. Die Hydrierung von Shreddermüll weist deutlich schlechtere Ergebnisse auf als Einsatzstoffe mit einem höheren Kunststoffanteil. Neben den hohen Kosten sprechen große Rückstandsmengen und die schlechte Qualität des Hydrieröls gegen diese Behandlung. Sie scheint nur für demontierte Kunststoffteile sinnvoll, wobei eine Kennzeichnung eine Optimierung bewirkt.

Gemische enthalten häufig Thermoplaste wie PE und PP, die bei höheren Temperaturen aufgeschmolzen werden können. Durch chemische oder technische Maßnahmen kann die Fließfähigkeit der Gemische weiter verbessert werden und eine partielle Umsetzung hervorgerufen werden, so daß ein fließ- und förderfähiges Gemisch entsteht, das der Hydrierung ohne Zusatz eines Fremdöles zugeführt werden kann. In anderen Fällen ist es vorteilhafter, ein Anmischöl zuzusetzen [70].

7.6.2 Produkte

Öle aus der Hydrierung von PE/PP oder von Kunststoffgemischen aus Hausmüllsortieranlagen zeichnen sich durch einen geringen Gehalt an hochsiedenden Produkten (Siedepunkt > 360 °C) sowie entsprechend höhere Naphta- und Mittelölanteile aus. Der hohe An-

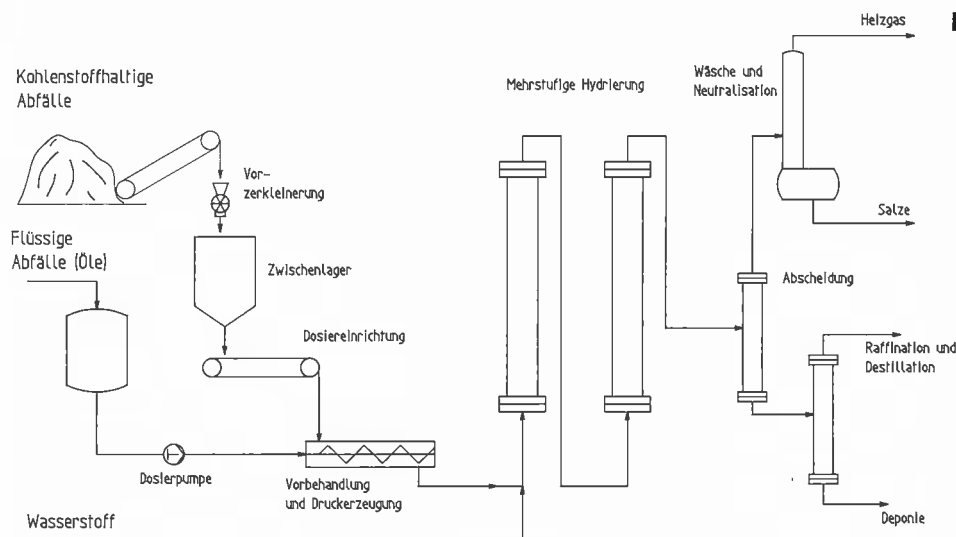


Bild 7.13 Verfahrensfließbild Kunststoffhydrierung (Konzept einer Pilotanlage) [70]

teil an aliphatischen Kohlenwasserstoffen (kettige Struktur) ist von Vorteil für die weitere Bearbeitung z.B. in Olefinanlagen. Die nach der Hydrierung erhaltenen Öle sind weitgehend gesättigt und können somit ohne Probleme gelagert werden. Eine Weiterverarbeitung der Hydrierprodukte kann nach den bisher vorliegenden Untersuchungen mit üblichen raffinerietechnischen Verfahren erfolgen [70]. Das Produkt aus der Hydrierung eines Kunststoffgemisches aus einer Müllsortieranlage zeichnet sich gegenüber Rohöl durch einen geringeren Anteil an hochsiedenden Anteilen aus [116].

7.6.3 Verfahrensablauf

In einer Hydrieranlage, wie sie z.Zt. von RWE im Labormaßstab betrieben wird, werden die Kunststoffabfälle zunächst zerkleinert und soweit wie möglich von Metallen, Glas und anderen anorganischen Materialien getrennt. Anschließend wird das zerkleinerte Produkt einer Vorbehandlung unterzogen. Ist das für die Hydrierreaktion benötigte Druckniveau (200 – 400 bar) erreicht, gelangt das Gemisch in den Reaktorteil. Die Verweilzeiten können zwischen 15 Minuten und mehreren Stunden variieren. Die Reaktionsparameter Verweildauer, Temperatur und Druck sind Optimierungsgrößen, die in enger Relation zur Qualität des Einsatzproduktes und der erzeugten Stoffströme zu sehen sind.

Bei dem derzeitigen Entwicklungsstand des Verfahrens liegen noch keine genauen Daten zur Energiebilanz vor. Da die Hydrierreaktion exotherm ist, beeinflusst der Anteil der Ballaststoffe die Energiebilanz. Ausgehend von einem Inertanteil von < 20 % errechnen die Betreiber der Laboranlage einen Wirkungsgrad von 60 – 70 %. Wirtschaftlich ist die Hydrierung aufgrund der niedrigen Rohölpreise und der hohen Investitionskosten – selbst bei kostenloser Anlieferung der Kunststoffabfälle – erst bei weiterem Anstieg der Entsorgungskosten. Beim Bau einer Hydrieranlage empfehlen die Betreiber die Anbindung an eine Raffinerie, um die Infrastruktur mitzubenutzen.

Die technische Entwicklung steckt allerdings noch in den Kinderschuhen; die Ergebnisse, die sich aus dem Betrieb einer Technikumsanlage ergeben, müssen abgewartet werden.

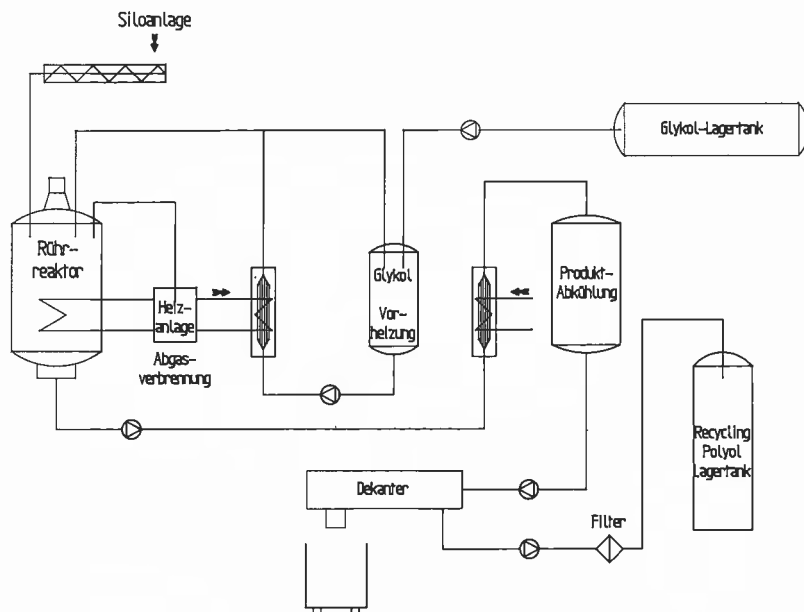
7.6.4 Vergleich Pyrolyse/Hydrierung

Einen entscheidenden Unterschied zwischen Pyrolyse und Hydrierung offenbart die Reaktionsgleichung. Während die Pyrolyse unter Sauerstoffausschluß und bei geringen Drücken betrieben wird, benötigt die Hydrierung die Aufrechterhaltung eines hohen Wasserstoffdruckes, hohe Temperaturen sind nicht erforderlich. Tabelle 7.11 stellt Hydrierung und Pyrolyse gegenüber.

	Pyrolyse		Hydrierung	
Reaktionsbedingungen				
Druck [bar]	1 – 10 (Sauerstoffausschluß)		100 – 300 (Wasserstoff)	
Temperatur [°C]	700		300 – 500	
Einsatz	PE/PP	Kunststoff aus Hausmüll	PE/PP	Kunststoff aus Hausmüll
Produkte				
Gase [Gew.-%] *	51	43	< 10	17
Öle (einschl. Naphta) [Gew.-%]	42	27	> 80	65
Rückstand (Teer, Feststoffe) [Gew.-%]	6	30	≈ 1	18

Tabelle 7.11 Gegenüberstellung Hydrierung/Pyrolyse [116]

Bild 7.16 Aufbereitungsanlage für PUR-Abfälle [11]



den erforderlichen Stoffaustausch zwischen Schaumstoff und Wasserdampf zu gewährleisten, besteht der Wellenbesatz der Schnecke im Hydrolysebereich überwiegend aus Knetelementen. Die mittlere Verweilzeit im Hydrolysebereich beträgt ca. 20 Minuten.

Das entstehende Flüssigkeits-Gas-Gemisch wird kontinuierlich durch ein Druck- und Entspannungssystem abgenommen und der Aufarbeitung zugeführt.

Vom Hydrolysegas – im wesentlichen CO_2 – mitgerissene flüchtige Anteile werden in einem nachgeschalteten Kühler kondensiert.

7.7.2 Produkte und Eigenschaften

PUR-Schaumstoff wird aus den beiden Komponenten Toluylendiisocyanat und Polyether hergestellt. Unter geeigneten Bedingungen kann PUR hydrolytisch in verschiedene Vorproduktebenen zurückgeführt werden. Aus dem Isocyanat-Anteil wird das Ausgangsamin und Kohlendioxid zurückgewonnen (Bild 7.15).

Vor der Wiederverwertung muß das Amin in Isocyanat überführt werden. Da der Polyether-Anteil sich durch die Hydrolysebedingungen nicht verändert, kann der gewonnene Polyether unmittelbar als Ausgangsprodukt eingesetzt werden.

Das Amin (TDA) – es kann zu etwa 90 % isoliert werden – ist im Gegensatz zum Polyether eine destillierbare Substanz.

Die Diamin-Extraktion mit wässrigen Säuren aus einer organischen Polyollösung erfordert einen hohen technischen Aufwand an Extraktions- und Rektifizierungsvolumen. Im Schaumstoff verwendete Emulgatoren erschweren zusätzlich eine Trennung von organischer und wässriger Phase.

Für die Aufarbeitung des Rohhydrolysats hat sich daher die Behandlung mit Oxalsäure als wirtschaftlich erwiesen. Versuche zeigten, daß Oxalsäure oder/und TDA-Oxalat im Reinpolyether nur gering löslich sind.

Das TDA lagert sich quantitativ unter Ausbildung eines grob-kristallinen, gut filtrierbaren Salzes an die Oxalsäure an. Dem Filtrückstand anhaftender Polyether wird mit Toluol ausgewaschen, so daß nach Abziehen des Toluols praktisch aminfreier Polyether gewonnen werden kann.

Alternativ zu diesem Verfahren wurde versucht, durch direkte Einleitung von HCl -Gas in das Hydrolysat, das Diamin in Form eines festen Hydrochlorids abzutrennen. Da das in sehr feindispersiver Form anfallende Diaminhydrochlorid zu vorzeitiger Verstopfung der Filter führte, sollte möglichst TDA-Monohydrochlorid gebildet und TDA-Dihydrochlorid unterdrückt werden. Dies wird erreicht, wenn die HCl -Einleitung in einem Temperaturbereich von etwa $70 - 90^\circ\text{C}$ erfolgt und das Rohhydrolysat mit Toluol auf etwa 50 % verdünnt wird.

Die am Beispiel der Polyurethan-Weichschaumstoffe erarbeitete Technik kann auch auf andere hydrolysierbare Kunststoffe übertragen werden. So können Polyurethan-Hartschaumstoffe und -Elastomere sowie PE, Polyamide, Polyharnstoffe und Polycarbonate durch die in der Schnecke einstellbaren Temperaturen, Drücke und Verweilzeiten hydrolysiert werden.

Die Verschäumbarkeit eines Regeneratpolyethers, die jeweiligen physikalischen Eigenschaften und die Eigenschaften der aus unterschiedlichen Regenerat- und Reinpolyether-Verschnitten hergestellten Schaumstoffe zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Ausgangspolyether. Für eine großtechnische Nutzung von Bedeutung ist die durch Wahl geeigneter Reaktionsbedingungen mögliche Verkürzung der Verweilzeiten auf ca. 3 Minuten [82].

Ein großtechnisches Verfahren wird derzeit mit Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, dem Verband der Automobilindustrie und der Kunststoffzeugenden Industrie bei der Fa. Ford in Köln entwickelt. Bei Ford könnten täglich

1,5 Mg anfallende PUR-Abfälle dem Recycling zugeführt werden [29].

7.8 Alkoholyse

Zur Aufarbeitung vermischter oder verunreinigter thermoplastischer Polyester, wie Polyamide, Polyurethane, Polycarbonate, läßt sich eine ihnen gemeinsame chemische Besonderheit zum Abbau in niedermolekulare Bindungen nutzen. Bestimmte Bindungen werden chemisch leicht angegriffen, so daß unter relativ milden Bedingungen und unter Anwesenheit bestimmter Reaktionspartner in einer Umkehrreaktion das Molekül dort gespalten wird, wo es bei der Polymerisation verknüpft wurde. Als Reaktionspartner wird im einfachsten Fall Wasser verwendet. Andere Reaktionsmittel sind Alkohole, Säuren oder Amine. Am besten untersucht sind diese Reaktionen bei Polyurethanen. Die Alkoholyse ist ein chemischer Prozeß, bei dem Emissionen chemischer Produkte zu erwarten sind. Neben Wasser und Kohlendioxid verlassen eine Reihe z.T. kondensierbarer organischer Substanzen den Reaktionskessel gasförmig [10].

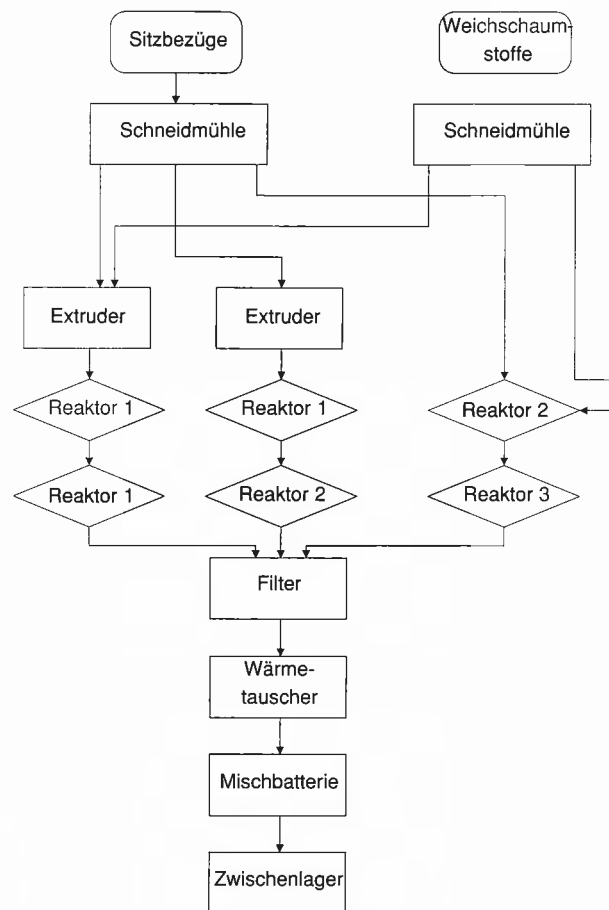
Diese als Umesterung bekannte Reaktion mit Alkoholen liefert mit PUR in einer Gleichgewichtsreaktion ursprüngliches Polyol und Urethanbruchstücke. Polyester und Polyamide können in derselben Weise alkoholysiert werden wie Polyurethane. Alle drei Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen mit unterschiedlicher Gleichgewichtslage. Eine vollständige Monomerisierung ist nur mit großem Diolüberschuß möglich. Da man aus praktischen Gründen mit möglichst niedrigem Diolüberschuß arbeitet, bleibt die Reaktion auf der Stufe von Oligomeren stehen. Polyester- und Polyamidtextilien bilden mit PUR-Weichschaumstoffen den Hauptteil von Automobilsitzen. Die Fertigungsabfälle sind als untrennbares Gemisch nicht wiederverwertbar. Untersuchungen zur Alkoholyse derartiger Abfälle zeigten, daß unter geeigneten Bedingungen homogene Polyolgemische herstellbar sind, aus denen harte Polyurethane geschäumt werden können [11].

7.8.1 Verfahrenstechnik

Um betriebsinterne Abfallprodukte umzuwandeln, hat ein PUR-Hartschaumstoffproduzent eine 5 Mg-Alkoholyseanlage aufgrund eigener Entwicklungen installiert und in Betrieb genommen. Die Anlage arbeitet diskontinuierlich in der Weise, daß die zerkleinerten PUR-Abfälle in heißes Glykol eindosiert werden, welches in einem 5 Mg-Rührreaktor vorgehalten wird. Flüchtige Reaktionsprodukte werden kondensiert bzw. an Aktivkohle absorbiert; das Polyol wird nach beendeter Reaktion gefiltert, abgekühlt über einem Wärmetauscher und in einen Vorratsbehälter gepumpt. Die Mischung wird mit Primärpolyol zur Blockschäumstoffherstellung verwendet [11]. Bild 7.16 zeigt die Aufbereitungsanlage für PUR-Abfälle.

In einem Forschungsvorhaben entwickelte Prof. Dr. G. Bauer von der Fachhochschule Aalen eine Methode, aus PUR Polyol zurückzugewinnen. An diesem Forschungsvorhaben beteiligt sind die Ford AG, der Verband der Automobilindustrie, der Verband der

Bild 7.17 Grundfließbild der Alkoholyse-Technikumsanlage [11]



Kunststoff erzeugenden Industrie sowie das Bundesministerium für Forschung und Technologie [106].

Ziel dieses Forschungsvorhabens war ein möglichst kontinuierlich arbeitendes Alkoholyseverfahren. Zur Unterstützung der notwendigen Löse- und Quellvorgänge der Polymerabfälle wurde als Vorstufe der mechanische Energieeintrag eines Extruders für sinnvoll erachtet. Ein mit einer Stopfschnecke ausgerüsteter Doppelwendeextruder wurde direkt mit einem 50 l-Rührreaktor verknüpft, der um zwei weitere Rührreaktoren (150 l und 100 l) erweitert wurde. Bild 7.17 zeigt, wie auf drei verschiedenen Verfahrenswegen verschiedenartige Abfälle umgesetzt werden. Das Produkt wird filtriert und über einen Wärmetauscher einem Lagerbehälter zugeführt [11].

7.8.2 Übertragung in industriellen Maßstab

Prof. Bauer sieht anhand der bisher durchgeführten Versuche die Möglichkeit, eine Reihe von Polymerabfällen im technischen Maßstab in wiederverwertbare Polyole umzuwandeln. Generell bieten sich zwei Möglichkeiten zur Realisierung an: die Kleinanlage für das innerbetriebliche Recycling und die gemeinschaftliche Großanlage. PUR-verarbeitende Betriebe produzieren i.d.R. sortenreine alkoholysierbare Abfälle in der Größenordnung von 100 bis einigen 100 Mg/a. Bei Volllastung wäre eine Anlage in der

Größenordnung der versuchserprobten Technikumsanlage mit zwei 100 l/200 l -Rührreaktoren in der Lage, diese Abfallmenge zu bewältigen. Bei Anlagenkosten von 200.000,- DM und einer Kapazität von 300 Mg/a errechnen sich fixe und variable Kosten von 0,50 DM/kg. Bei einem Materialeinsatz von maximal 1,- DM/kg Polyol ergeben sich Gesamtkosten von etwa 1,50 DM/kg, die unter dem momentanen Preis für entsprechende Primärpolymere liegen.

Für eine Anlage mit einer Produktivität von ca. 3.000 Mg/a würden sich, bei hochgerechneten Anlagenkosten von 1 Mio DM für eine komplette Betriebs-einheit, Betriebskosten von ebenfalls 0,50 DM ergeben. Eine derartige Anlage entspricht der Vergrößerung einer Technikumsanlage um den Faktor 10 [10].

7.8.3 Endprodukt

Das durchschnittliche Mengenverhältnis von Sitzbezug zu Weichschaumstoffabfällen bei den Versuchen betrug 1:1,5, jenes vom Gesamtabfall zu Polyol 2:1. Dabei schwankten relevante Polyolwerte, Hydroxyl-, Säurezahl und Viskosität in relativ engen Grenzen.

Als Beispiel wird eine für die PUR-Herstellung verwendete Charge aus einer der letzten Versuchsreihen angeführt:

– dynamische Viskosität [mPa/s]	5,5
– Hydroxylzahl [mgKOH/g]	380
– Säurezahl [mgKOH/g]	1,5
– Wasser [%]	0,1
– Aromatische Amine [%]	0,5

Rechnerisch liegt die Hydroxylfunktionalität der Polyolgemische zwischen zwei und drei. Prof. Bauer hält die Mischbarkeit mit anderen Polyolen für problemlos und damit die Einstellung der Polyoleigenschaften auf diverse Anwendungszwecke für machbar [11].

Durch Oligomerisierung z.B. von Acrylsäure, die simultan durch Veresterung mehrfunktionelle Bausteine bildet, läßt sich eine höhere Funktionalität für die Herstellung von harten PUR erreichen. Bei einem Anteil von 10 % Acrylsäure bleibt das Reaktionsprodukt niederviskos und homogen. Alle hergestellten Polyole zeigen gute Lagerfähigkeit. Phasentrennung und Eigenschaftsveränderungen konnten nicht beobachtet werden [11].

8. Aufbereitungsverfahren

Für den Bereich der technischen Kunststoff-Teile mit geringen Anforderungen an Farbe und physikalische Eigenschaften ergeben sich für kunststoffverarbeitende Betriebe, insbesondere Spritzgießbetriebe, nicht zuletzt aufgrund der Preisspannen zwischen Neuware und Regenerat interessante Perspektiven.

Bild 8.1 zeigt die Preisentwicklung für HDPE, LDPE, PP und PVC (Neuware) zwischen Anfang 1986 bis Anfang 1991.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die derzeit in der Bundesrepublik angebotenen Verfahren. Am Ende dieses Abschnittes befindet sich eine Übersicht der dargestellten Verfahren.

8.1 Amberger Kaolinwerke

Anbieter: AKW Apparate + Verfahren GmbH
1 Postfach 11 69
Tel.: (0 96 22) 1 83 30
Fax.: (0 96 22) 1 83 76

Verfahrensbeschreibung

Das Aufbereitungsverfahren ist zur Rückgewinnung einer Polyethylen-Wertfraktion als Regranulat aus vorsortierten Haushalts- bzw. Gewerbeabfällen konzipiert (Bild 8.2).

Anwendungsgebiete des AKW-Verfahrens sind:

- PET-Recycling;
- Rückgewinnung von PP aus Akkumulatoren-Schrott;
- Aufbereitung von Polyolefinen aus vorsortiertem Hausmüll;
- Rückgewinnung sortierter Kunststofffraktionen aus Shreddermüll;

- Abtrennung sortenreiner Kunststoffe aus Geweremüll bzw. Produktionsabfällen, z.B. aus der Kabelschrott-Aufbereitung.

In der ersten Verfahrensstufe werden die Kunststoffballen vorzerkleinert. Das aufgelockerte Gemisch wird über Förderbänder und Magnetscheider einer Mühlenstation zugeführt, wobei in einem Voredimentbeken größere mineralische Verschmutzungen abgeschieden werden. Die Mühle arbeitet unter Zusatz von Wasser, um über hohe Friktion einen Vorwascheffekt zu erzielen. Gleichzeitig dient das Wasser zur Kühlung. Das in Schnitzelform vorliegende Kunststoffgemisch wird in einem Verweilbecken bei einstellbarer Verweildauer gewaschen.

Anschließend erfolgt die Separierung über Hydrozyklone (Bild 8.3) in eine Schwerfraktion (PS, PVC u.a.) und in eine Leichtfraktion (PE, evt. bis 50 % PP). Die Schwerfraktion wird entwässert. Als zusätzliche Option kann diese Fraktion über Schwertrübezyklonstufen in weitere Kunststoffkomponenten aufgetrennt werden.

Die Schnitzel der Leichtfraktion werden einer Zentrifugalentwässerung zugeführt und über eine thermische Trocknung bis auf eine Restfeuchtigkeit von 0,2 bis 0,4 % getrocknet. Vor der Verarbeitung in einem Extruder werden die trockenen Kunststoffschnitzel vorsortiert und über Rühraggregate intensiv gemischt, um die Homogenität des Vorproduktes zu gewährleisten.

Über ein Stopfwerk wird das Schnitzelgut dem Extruder zugeführt, der durch mehrere unabhängig steuerbare Schneckenzone beheizt wird. Das eintretende Material wird unter Hitze plastifiziert. In einem drucklosen Entgasungsteil werden flüchtige Bestandteile

Bild 8.1 Preisentwicklung von PE, PP und PVC (Neuware)

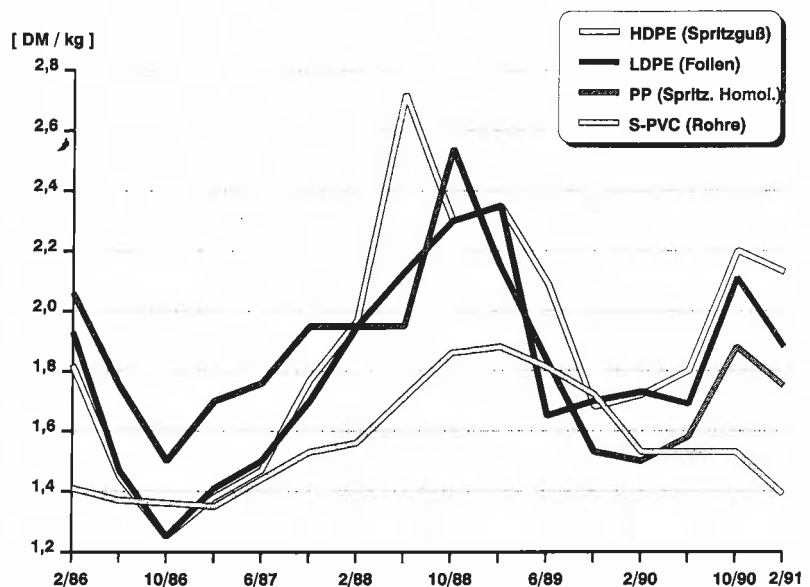
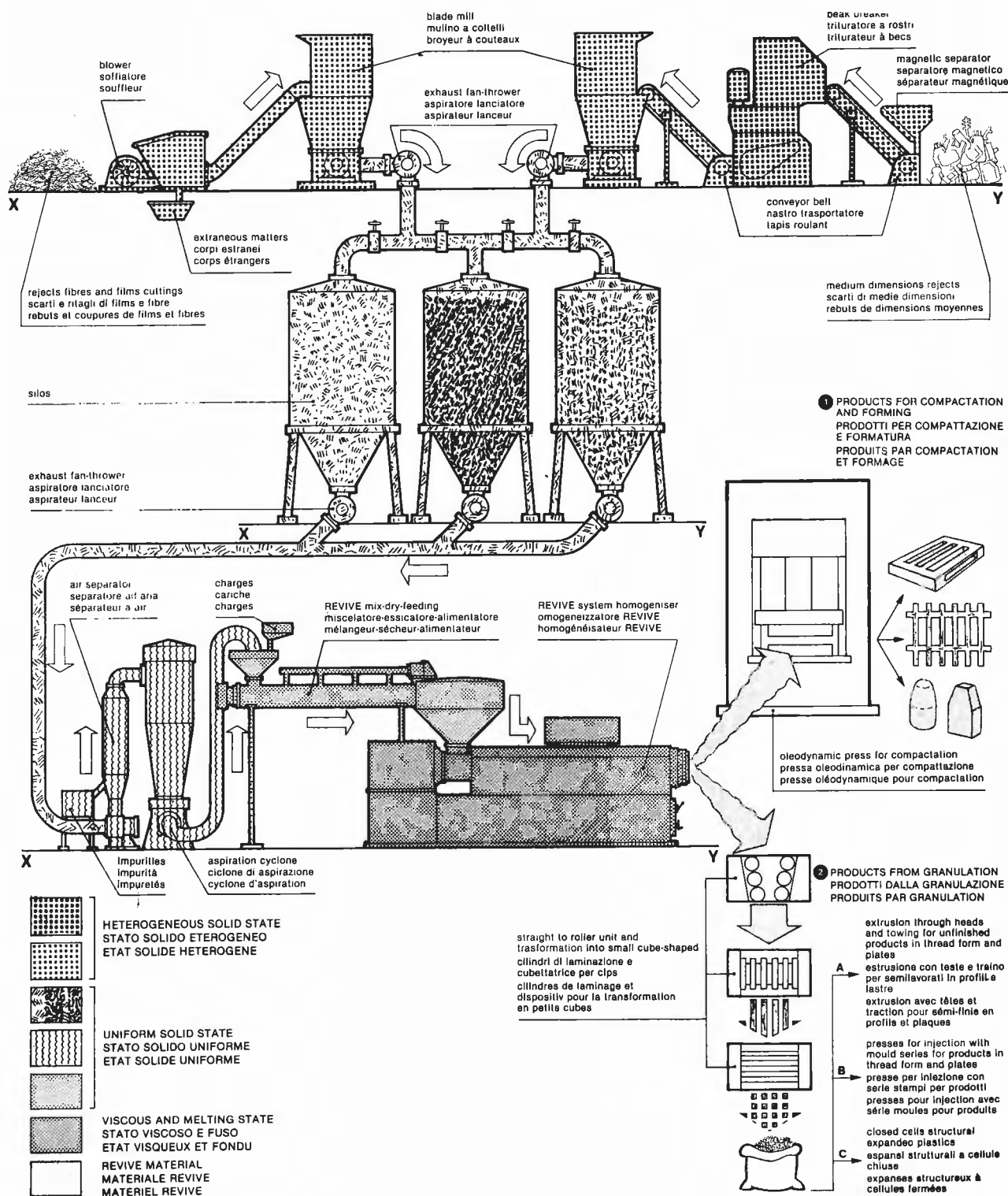


Bild 8.2 Aufbereitungsverfahren zur Gewinnung von PE-Granulat, System AKW [124]



- | | | |
|---------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 Förderbänder | 6 Mühle | 17 Stopfwerk |
| 2 Vorzerkleinerer | 7 Verweilbecken | 18 Extruder |
| 3 Förderbänder | 8/11 Hydrozyklon | 19 Granulator |
| 4 Magnetscheider | 12/14 Entwässerung | 20 Zentrifugalentwässerung |
| 5 Vorsedimentbecken | 15 Trocknung | 21 Silo |
| | 16 Zwischensilo | |

Bild 8.3 Hydrozyklone der Fa. AKW [1]



wie Luft, Wasserdampf, Oxidationsprodukte sowie monomere Restanteile über ein Vakuum abgezogen.

Am Ende des Extruders befindet sich ein Schmelzefilter (gängige Siebgrößen: 200 bis 2.000 Maschen/cm²), um Restverunreinigungen aus der Schmelze zurückzuhalten. Der Schmelzefilter ist mit einem automatischen Siebwechsler ausgerüstet. Die Zeit zwischen zwei Siebwechseln ist ein Maß für den Verunreinigungsgrad der Schmelze. Diese ist abhängig von der Siebmaschenweite.

Die über den Granulierkopf austretende Schmelze wird durch rotierende Messer direkt abgeschlagen. Die noch heißen Granulate werden durch Wasserbedüsung vorgekühlt und gelangen über eine Kühlstrecke zu einem Zentrifugalentwässerer. Von dort aus kann das granuliert Produkt über pneumatische Fördersysteme siliert oder abgesackt werden.

Materialbilanz

Die Anlage ist zur Entsorgung von einer Million Einwohner, entsprechend etwa 6.000 Mg/a bzw. 1 Mg/h ausgelegt. Als Input dient Ballenware aus der „Grünen Tonne“. Alternativ wäre die Verarbeitung von losem Material in Containern aus Gewerbe und Industrie möglich. Folienmaterial mit einem Input von 1 Mg/h ergibt einen Output von 0,55 - 0,65 Mg/h Regranulat.

Energiebilanz

Der elektrische Energiebedarf beträgt 750 kWh/Mg.

Produkteigenschaften

Über den Input des Materials können die Qualitäten des Regranulates bestimmt werden. Die Materialien können nach Folienware (meist LDPE) und Hohlkörperqualität (meist HDPE) getrennt werden. Die erforderlichen

Daten für Folien- und Hohlkörperqualität können bestimmt werden.

Gemäß firmeninternen Untersuchungen sind die erforderlichen Kennwerte durchaus mit den Werten der Neuware vergleichbar, so daß aus bestimmten Regranulaten wieder

- Folien;
- Extrusionsartikel (Rohre, Profile usw.);
- Spritzgußartikel;
- Hohlkörper und
- Preßteile
- hergestellt werden können.

Die Schmelzindices MFI 190/2,16 des aufbereiteten Produktes liegen zwischen 0,03 und 0,2 g/min., die Dichte bei 0,94 bis 0,96 g/cm³ und damit im Toleranzbereich entsprechender Neuware.

Die Granulatfarbe ergibt sich aus der Mischung des Inputmaterials. Die Akzeptanz des produzierten PE-Regenerates aus Hausmüll ist nach Firmenauskunft gegeben.

Wirtschaftlichkeit

Nach den bisherigen Ermittlungen liegen die Aufbereitungskosten bei etwa 0,70 DM/kg erzeugten Granulats. Endgültige Daten können erst nach längerem Betrieb der Anlage ermittelt werden. Bei der Kostenermittlung wird von einer kostenlosen Abnahme vorsortierter Kunststoffabfälle ausgegangen. Die Anlage ist wirtschaftlich interessant.

Entwicklungsstand

Die erste Anlage dieser Art wurde im Mai 1989 in Oberfranken in Betrieb genommen, um die häuslichen Kunststoffabfälle des Einzugsgebietes zu verarbeiten. Zur Überprüfung der theoretischen und experimentellen Werte diente eine dreimonatige Testphase. Durch mechanische Vorsortierung wird das Inputmaterial eindeutig (siehe Tabelle 8.1) bestimmt. Seit Januar 1990 arbeitet die Anlage im Zweischichtbetrieb. Das Regranulat trifft einen guten Absatzmarkt, eine Lagerhaltung ist nicht notwendig.

Betreiber: Zweckverband Abfallbeseitigung
Nord-West-Oberfranken

Standort: Deponie Blumenrod

8.2 Entec-Verfahren [36]

Anbieter: Entec Gesellschaft für
Abfallwirtschaft Energie- und Umwelt-
technik GmbH
Dipl.-Ing. Roland Konstantiniuk
Posnergasse 12
A-8045 Graz-Andritz
Tel.: (0043 316) 67 17 12

Verfahrensbeschreibung

Das Verfahren (Bild 8.4) – es entspricht der Anlagenentwicklung der Firma Andritz, Graz – ist für die Aufbereitung von Folien, Behältern und Gemischen von Folien mit Behältern geeignet. Der Verfahrensablauf ist nach einem Baukastenprinzip aufgebaut, der je

Tabelle 8.1 Input Material der Anlage AKW

Erwünschte Produkte	Material	Unerwünschte Produkte	Material
Flächiges Material		Verbundmaterialien	
Tüten, Tragetaschen, Folienverpackungen	PE/PP/PVC	Softdrinkverpackungen	PE/AL
		Kaffeeetüten	PE/AL
Plastiksäcke, Abdeckfolien	PE/PP/PVC	Zigaretenschachteln	AL/PE, Papier
		Auto-, Fahrradreifen	EPDM
Agrarfolien	PE	Kunststofftextilien	PA/PET
Film-Folien	PET/PE/ PP/PVC	Schuhe	EPDM/PUR
Hohlkörper		Geschäumtes Material	
Spülmittelflaschen	EVA/PE/PVC	Styropor, Haushaltsschwämme	EPS/PUR
Flaschen + Behälter (Lebensmittel)	PET/PVC/ PE/PP	Dichtungsmaterialien	
Flaschen + Behälter (Haushalt)	PVC/PE/PP	Polstermaterialien	
Flaschen + Behälter (Gewerbe)	PVC/PE/PP	Autoverkleidungen, Stoßstangen	
Sonstige		Sonstige	
Wäschewannen, Kunststoffkästen, Kunststoffeimer, Getränkekästen, Mülltonnen	PE/PP/PVC	Kunststoffprofile mit Metallkern	
	PE/PP	Teppichböden	
		Spielzeug	PE/PP/PA/ PVC/PS
		Bälle	PE/Elastomere
		Gehäuse von Elektrogeräten	PE/PP/PVC/ Polymere
		Joghurtbecher	PS/PE
		Kunststoffgeschirr	PS/PVC/PE/PP

nach Aufgabenstellung zu einer bestimmten Verfahrenskette zusammengesetzt wird.

Die Verfahrensschritte hängen von der Zusammensetzung der abzutrennenden Fremdstoffe (Papier, Holz, Draht etc.), Kunststoffe (PVC, PS PET etc.), der Verschmutzung (Sand, Erde etc.) und von dem zu erzeugenden Endprodukt (Regranulat, Agglomerat, Mahlgut etc.) ab.

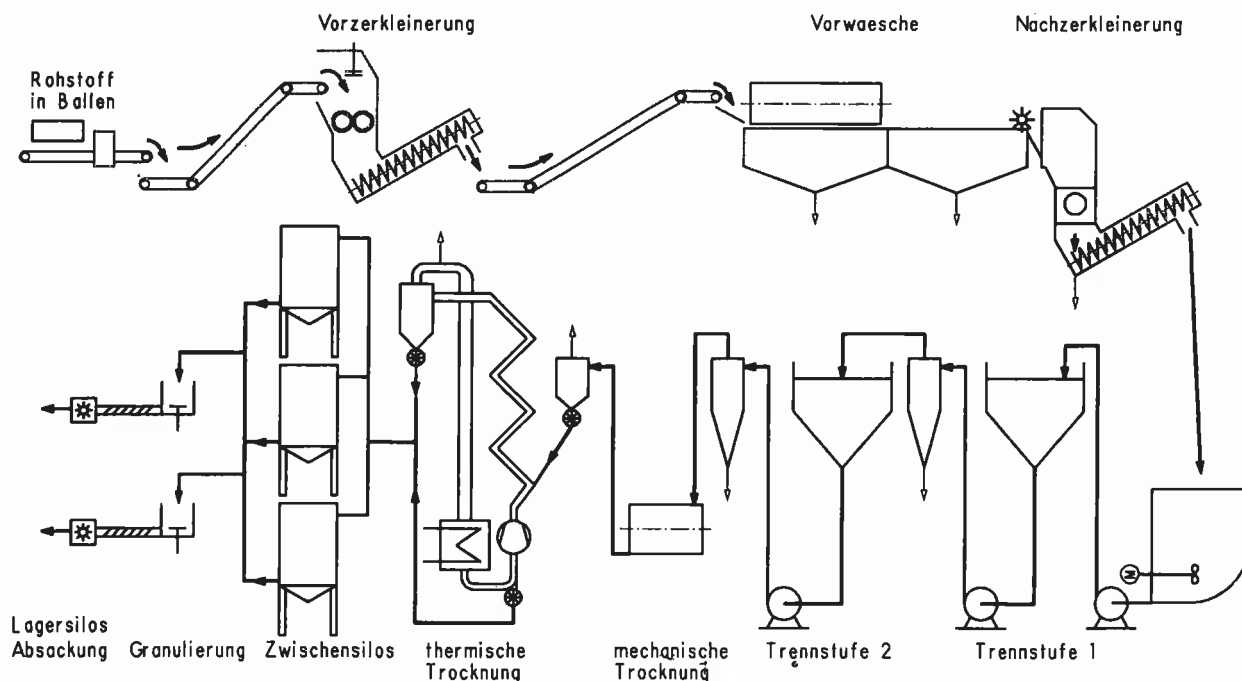
Folienaufbereitung

Die in Ballen gebundenen Altkunststoffe werden auf das Aufgabeförderband aufgegeben. Dort werden die Drähte aufgeschnitten und entfernt. Hier ist die Möglichkeit der Kontrolle und Aussortierung von Fremdstoffen gegeben. Ein Metallsuchgerät kann installiert werden.

Es folgt die Vorzerkleinerung in einem Zweiwellenzerkleinerer zu handtellergrößen Kunststoffteilen, die in die Vorwäsche gelangen. Die Kunststoffe werden intensiv gewaschen und Teile (wie z.B. Steine, Glas, Drahtstücke etc.), die ein größeres spezifisches Gewicht als Wasser haben, ausgeschieden. Auch Kunststoffe wie PVC oder PET werden hier teilweise schon abgetrennt.

Die Vorwäsche ist die Voraussetzung für ein qualitativ und quantitativ gutes Ergebnis der nachfolgenden Btonschneidmühle. Die Kunststoffteilchen werden in die Mühle geschwemmt. Zusätzliches Wasser wird zwecks Kühlung der Kunststoffe und weiterem Wascheffekt zugegeben. Diese schnelllaufende Mühle soll die Kunststoffe zu möglichst großen Teilen mit glatten Schnitten zerschneiden. Dies ist wichtig für die Trenneffekte in der Hydrozyklonstufe, ebenso wird

Bild 8.4 Aufbereitungsverfahren der Fa. ENTEC



damit die Entwässerungs- bzw. Trocknungsleistung beeinflusst.

In einer Misch- und Homogenisierungsbütte werden die Kunststoffteilchen innerhalb der Gesamtmasse homogenisiert, was wiederum für die nachfolgende Trennung im Hydrozyklon wichtig ist. Die Büttengröße ergibt zusätzlich ein Puffervolumen.

Zwei Zyklonstufen sind mit einer dazwischen vorgesehenen weiteren Mischbütte in Serie geschaltet. Eine Zyklonstufe besteht aus mehreren parallel geschalteten Einzelzyklonen. Im Unterlauf werden die Nichtpolyolefinanteile abgeschieden. Der Überlauf (Gutstoff) wird in einer mechanischen Trocknung entwässert. Anschließend erfolgt die thermische Trocknung.

Bei der Aufbereitung von Folien ist eine thermische Trocknung auf jeden Fall notwendig. Diese ist als Zick-Zack-Windsichter ausgeführt. Schwerere d.h. dickere Teilchen (von Behältnissen) fallen gegen den Luftstrom nach unten und werden ausgetragen. Dieses Ausschleusen der meist aus HDPE produzierten PE-Behältnisse steigert die Qualität des Regranulates aus Folien, die meistens aus LDPE hergestellt werden.

Bei einer gemischten Anlieferung von Folien und Behältern kann daher eine manuelle Vortrennung unterbleiben. Die Trennung von HDPE und LDPE wird durch diese Sichtmöglichkeit erreicht. Vor der Extrusion können die Folienschnitzel auf ein Speicherband gepuffert werden.

Die Extrusion ist als Entgasungsextruder mit Siebwechsler incl. Rückspülsystem ausgestattet. Hier können mit Hilfe von feinsten Sieben noch im schmelz-

flüssigen Zustand Fremdstoffe entfernt werden. Nach neuesten Erkenntnissen wird der Siebwechsler vor der Entgasungszone eingesetzt. Mittels Heißabschlag wird linsenförmiges Regranulat erzeugt, das in die Schicht- und Lagersilos geblasen wird.

Der weitestgehend geschlossene Wasserkreislauf ist zweistufig vorgesehen. Es wird jeweils geklärtes Wasser als Waschwasser verwendet, wobei das reinere Wasser zum Schluß als Verdünnungswasser in den Zyklonstufen verwendet wird. Das Frischwasser wird in der Extrusion und bei der mechanischen Klärung eingesetzt.

Behälteraufbereitung

Bei der Behälteraufbereitung kann je nach Verschmutzung und Anlieferungszustand auf die Vorzerkleinerung und Vorwäsche verzichtet werden. Meistens sind auch die thermische Trocknung und die Entgasung bei der Extrusion nicht notwendig.

Materialbilanz

Als Einsatzmaterial dienen gemischte und verschmutzte Folien und Behälter (HDPE, LDPE) aus Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Haushalten. Die Kapazität der Anlage liegt bei 1 Mg/h, entsprechend 5.000 Mg/a. Durch Modifikation der Anlage können alle Kunststoffabfälle verarbeitet werden.

Energiebilanz

Der elektrische Energiebedarf beträgt in Abhängigkeit vom Einsatzstoff und vom Endprodukt 500 – 1.000 kWh/Mg Produkt. Der Wasserbedarf ist ebenfalls abhängig vom Einsatzstoff und vom Endprodukt und beträgt 5 – 10 m³/Mg Produkt.

Produkteigenschaften

Produziert werden hochwertige PE-Granulate und PE-Mahlgut, deren Eigenschaften vom Rohstoff abhängig sind. Selbst bei hoher Verschmutzung des Rohstoffes oder bei gemischten Rohstoffen wird ein Anteil von nicht-thermoplastischen Stoffen im Granulat < 1 Gew.% garantiert. Das Granulat kann extrudiert, in Formen gepreßt und zu Folien (> 40 m) geblasen werden.

Wirtschaftlichkeit

Der Betrieb erfolgt in drei Schichten. Die Gesamtkosten der Aufbereitung betragen in Abhängigkeit von Einsatzstoff und Endprodukt 0,40 – 0,70 DM/kg Endprodukt. In diesem Betrag sind Kosten für die Bau-Infrastruktur und möglicher Kosten für den Input nicht enthalten.

Entwicklungsstand

Pilotanlage Wien, A:	PE-Granulat, Mahlgut Mehrjährige Betriebserfahrung incl. Vermarktung
Betriebsanlage Wildon, A:	1 Mg/a PE-Granulat, Inbetriebnahme Mitte 1988
Betriebsanlage Himberg, A:	0,5 Mg/h PE Regranulat- und Mahlgut Inbetriebnahme 1991

8.3 REFAKT Anlagenbau [120]

Anbieter: Anlagenbau GmbH
Industriestraße 23/1
D-6922 Meckesheim
Tel.: (06226) 6122/3641
Fax.: (06226) 8912

REFAKT ist der Zusammenschluß der Herbold GmbH (Einführung der Naßzerkleinerung mit Waschmühlen) und der B & B Anlagenbau GmbH (Entwicklung eines Trennverfahrens).

Aus den Anlagenkomponenten der beiden Verfahren werden Anlagen nach dem Baukasten-Prinzip konzipiert. Im Folgenden werden beide Verfahren nacheinander beschrieben (Bild 8.5 und Bild 8.6).

Verfahrensbeschreibung System B & B Anlagenbau

Die Abfälle werden über ein Förderband (1) mit integriertem Metalldetektor (2) einer Schneidmühle (3) zugeführt und anschließend in einem Rührbehälter (4) zwischengelagert. In einer ersten Reinigungsstufe, bestehend aus Hydrozyklon (5) und Friktionswäscher (6), werden die Abfälle vorgereinigt und in ein Naßsilo (7) gefördert. Im Naßsilo werden die Abfälle durch Zugabe von Kreislaufwasser angefeuchtet bzw. naßgehalten.

Ein am Boden des Silos befindliches Mischwerk sorgt für ein laufendes Umwälzen und Durchmischen der Abfälle. Nach einer Verweilzeit von 1 bis 2 Stunden wird das Material über eine Schnecke aus dem Silo ausgetragen und einer chargenweise betriebenen

Bild 8.5 Aufbereitungsverfahren zur Gewinnung von PE-Schnitzeln, System B. u. B. Anlagenbau

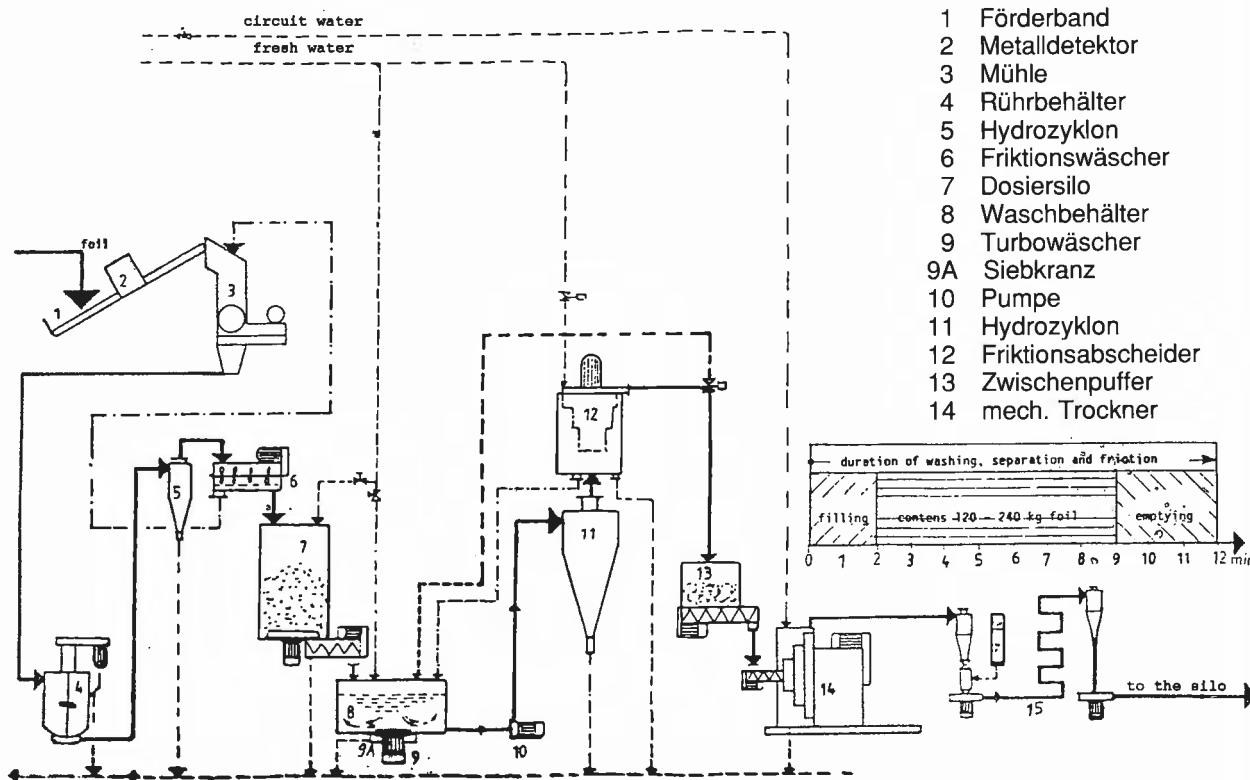
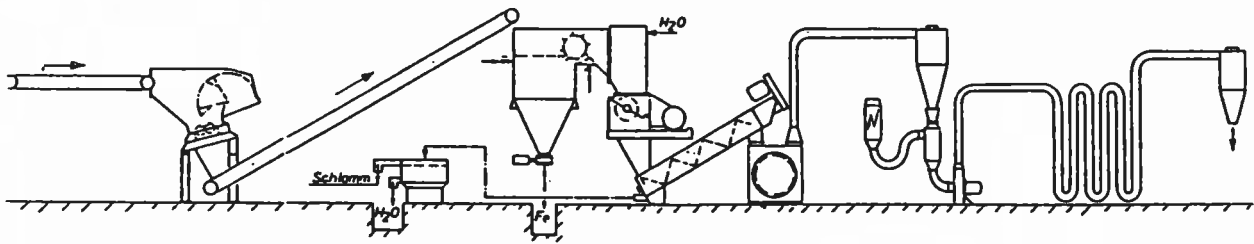


Bild 8.6 Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage der Fa. Herbold



zweiten Reinigungsstufe zugeführt. Über die am Silo oder Dosierbehälter integrierten Wiegestäbe wird durch Gewichtsvorwahl ein gleichbleibendes Chargengewicht erreicht.

Die in den Waschbehälter (8) eingetragenen Abfälle werden von einem Turbowäscher (9) eingerührt. Durch einen Siebkranz (9A), der den Turbowäscher umschließt, werden bei laufender Zugabe von Spülwasser die gelösten Teile (Papierfasern, Holz, Sand, Lehm usw.) abgeführt. Bei normalem Betrieb setzt mit Beginn des Produkteintrages auch der Trenn- und Friktionsprozeß ein. Dabei fördert eine Pumpe mit offenem Laufrad (10) das Produkt-Wassergemisch in den Hydrozyklon (11).

Der Überlauf des Zyklons wird zur Wasserabscheidung einem Stufen-Friktionsabscheider (12) zugeleitet. Hier werden die anhaftenden Papierfasern, feinsten Lehm usw. mit frischem Wasser nach Entfernen des Schwallwassers abgespült und ausgetragen.

Das Produkt wird nach Passieren einer Umschaltweiche wieder dem Waschbehälter zugeleitet. Der Wasch- und Trennprozeß wird je nach Verschmutzungsgrad wiederholt, (vier- bis zehnmal), wodurch ein Reinheitsgrad von bis zu 99 % erreicht werden kann.

Nach Ablauf der Prozeßzeit wird das Produkt nach Umschalten der 2-Wegeweiche, einem Zwischenpuffer (13) zugeführt und von dort aus über eine Aus-tragsschnecke der mechanischen und thermischen Trocknung zugeführt.

Der mechanische Stufen-Trockner (14) ist als Zentrifuge ausgeführt und bringt das gereinigte Produkt auf eine geringe Oberflächen-Restfeuchte.

Die durch die Lochung des Siebkorbes der Zentrifuge durchgeschlagenen Partikel werden von einer automatisch arbeitenden Abreinigung entfernt und mittels Spülwasser aus dem Trocknergehäuse entfernt.

Über einen Zyklon, von der Transportluft getrennt, werden die noch feuchten Kunststoffabfälle der thermischen Nachtrocknung (15) zugeleitet. Hier wird vor dem Eintritt in den Förderventilator das Produkt mit Heißluft vermischt, dieses Gemisch im Förderventilator verwirbelt und durch eine anschließende Nach-trocknenstrecke geblasen. In der Nachtrocknenstrecke wird durch Umlenkungen eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen der heißen Transportluft und dem Förderprodukt erzeugt. Nach einem nochmaligen Luftaustausch wird das Produkt der Weiterverarbeitung zugeleitet.

Durch eine entsprechende Ablufttemperaturmessung kann der gesamte Trocknungsprozeß vollkommen automatisiert und überwacht werden.

Verfahrensbeschreibung System Herbold

Die Kunststoffabfälle werden in einer naß arbeitenden Schneidwalzenmühle vorzerkleinert. Dadurch wird die Standzeit der Messer gegenüber der Trockenzerkleinerung deutlich verlängert. Als weiterer Vorteil der Naßzerkleinerung wird angeführt, daß in die Schnittflächen des Kunststoffes kein Schmutz eingerieben wird, wie dies beim trockenen Mahlen, vor allem mit stumpfen Messern, der Fall ist.

In einem der Naßzerkleinerung nachgeschalteten Ab-setzbecken wird das Material mittels einer Walze unter den Wasserspiegel gedrückt, wobei Steine, Metallteile und andere grobe Verunreinigungen abgespült werden und im Wasser nach unten sinken. Durch taktweises Öffnen eines Schiebers wird die Schwerfraktion aus dem Behälter abgezogen. Die schwimmenden Bestandteile werden einer zweiten Zerkleinerungsstufe zugeführt, die zur Erhöhung des Reinigungseffektes noch zusätzlich mit Wasser beaufschlagt wird.

Nach dem Mahlen fällt das Material in einen Friktionswäscher, aus dem es mittels einer schnellaufenden Schnecke (Teilentwässerung) ausge-tragen und in einen mechanischen Trockner gefördert wird. Durch den mechanischen Trockner wird die Feuchtigkeit der Kunststoff-schnitzel auf 3 bis 8 % reduziert. In einer Trocknungsstufe werden die Schnitzel thermisch nachgetrocknet.

Zwischen dem Friktionswäscher und dem mechanischen Trockner kann ein Trennbehälter geschaltet werden, so daß Verunreinigungen, die schwerer als Wasser sind, fast zu 100 % abgeschieden werden können. Die getrockneten und gereinigten Kunststoff-schnitzel werden schließlich einer Granulierung zugeführt. Dabei können Verschnitte mit neuem Kunststoff oder Einfärbungen erfolgen.

Materialbilanz

Als Einsatzstoffe dienen gemischte und verschmutzte Kunststoffabfälle mit einem Hauptanteil an PE (Folien, Tragetaschen). Die Verunreinigungen bestehen im wesentlichen aus Papier, Etiketten und Holz.

Energiebilanz (System Herbold)

Der spezifische Energiebedarf ist abhängig von der

Installierte elektrische Leistung	normal verschmutzt (z. B. Schrumpfhäuben) Durchsatzleistung		stark verschmutzt (z. B. Landwirtschaftsfolie) Durchsatzleistung	
	500 kg/h	1000 kg/h	1000 kg/h	1500 kg/h
Ballenmagazin	—	—	3 kW	3 kW
Vorzerkleinerer	—	—	37 kW	42 kW
Vorwäsche	—	—	15 kW	15 kW
Naßmühle	45 kW	75 kW	75 kW	75 kW
Fraktionswäscher	11 kW	22 kW	22 kW	22 kW
Mech. Trockner	22 kW	44 kW	44 kW	44 kW
Therm. Trockner	45 kW	75 kW	75 kW	90 kW
Gesamtinstallation	123 kW	216 kW	268 kW	291 kW
Verbrauch (Gleichzeitigkeitsfaktor 0,6)	73,8 kWh	129,6 kWh	160,8 kWh	174,6 kWh
Energieverbrauch	0,15 kWh/kg	0,13 kWh/kg	0,16 kWh/kg	0,12 kWh/kg

Tabelle 8.2 Energiebilanz REFAKT

Anzahl der Waschzyklen. Der Frischwasserbedarf beträgt ca. 4 m³/h.

Produkteigenschaften

Das hergestellte Regranulat eignet sich zur Herstellung von Blasfolien (z.B. für Müllsäcke oder Landwirtschaftsfolien) oder hochwertigen Spritzgußteilen (z.B. Container).

Wirtschaftlichkeit

Bei 100 kg/h Durchsatz: 0,30 – 0,50 DM/kg für Aufbereitung
0,20 – 0,30 DM/kg für Extrusion

Entwicklungsstand

Insgesamt wurden 41 Anlagen weltweit nach beiden Verfahren installiert. Ein Teil der Anlagen dient der Aufbereitung von Kunststoffen aus Haushaltsabfällen.

8.4 Thyssen Henschel [85]

Anbieter: Thyssen Henschel
Postfach 10 229 69
3500 Kassel
Tel.: 0561/8011

Verfahrensbeschreibung

Im Kunststoff-Recycling-Technikum können unterschiedliche Zerkleinerungs-, Reinigungs- und insbesondere Trennverfahren für verschmutzte und gemischte Thermoplast-Abfälle getestet werden. Das Ziel ist eine technische, wirtschaftliche und umweltbezogene Optimierung der Verfahrenskomponenten. Im Vorfeld von Planung und Projektierung einer stofflichen Recycling-Anlage sollen so exakte Anlagen-Konfigurationen ermittelt werden, die den jeweiligen Erfordernissen gerecht werden. Die Dimensionierung des Technikums wurde so gewählt, daß die Testergebnisse auf industrielle Großanlagen übertragbar sind.

Materialbilanz

In der Anlage werden verschmutzte, vermischte thermoplastische Kunststoffabfälle und auch Verbundmaterialien aufbereitet. Begleitende Untersuchungen zur Verfahrensoptimierung werden durchgeführt. Die wiedergewonnenen Endprodukte sind Polyethylen, Polystyrol, PVC und Aluminium. Der Reinheitsgrad erreicht mindestens 98 %, die Verschmutzung wird mit unter 1 %, die Restfeuchte mit unter 0,5 Gew % angegeben. Das Technikum ist für einen Durchsatz von 300 Mg/h, in Einzelfällen bis 500 Mg/h, ausgelegt.

Produkteigenschaften

Produziert werden nahezu sortenreine Regranulate aus PE, PS und PVC, die für die entsprechende Weiterverarbeitung geeignet sind. Darüberhinaus entsteht im Aufbereitungsprozeß Aluminium.

Wirtschaftlichkeit

In die Technikum-Anlage wurden bislang 800 TDM investiert, die jährlichen Betriebskosten betragen 300 TDM.

Entwicklungsstand:

1990 wurde eine Technikumsanlage insbesondere zur Optimierung der Trennung in Betrieb genommen. Eine Referenzanlage zur Trennung gemischter Kunststoffabfälle wurde in Kooperation mit der Firma Phemix Resources 1986 in Sofia/Bulgarien installiert. Der Durchsatz der Anlage beträgt 1.000 Mg/h.

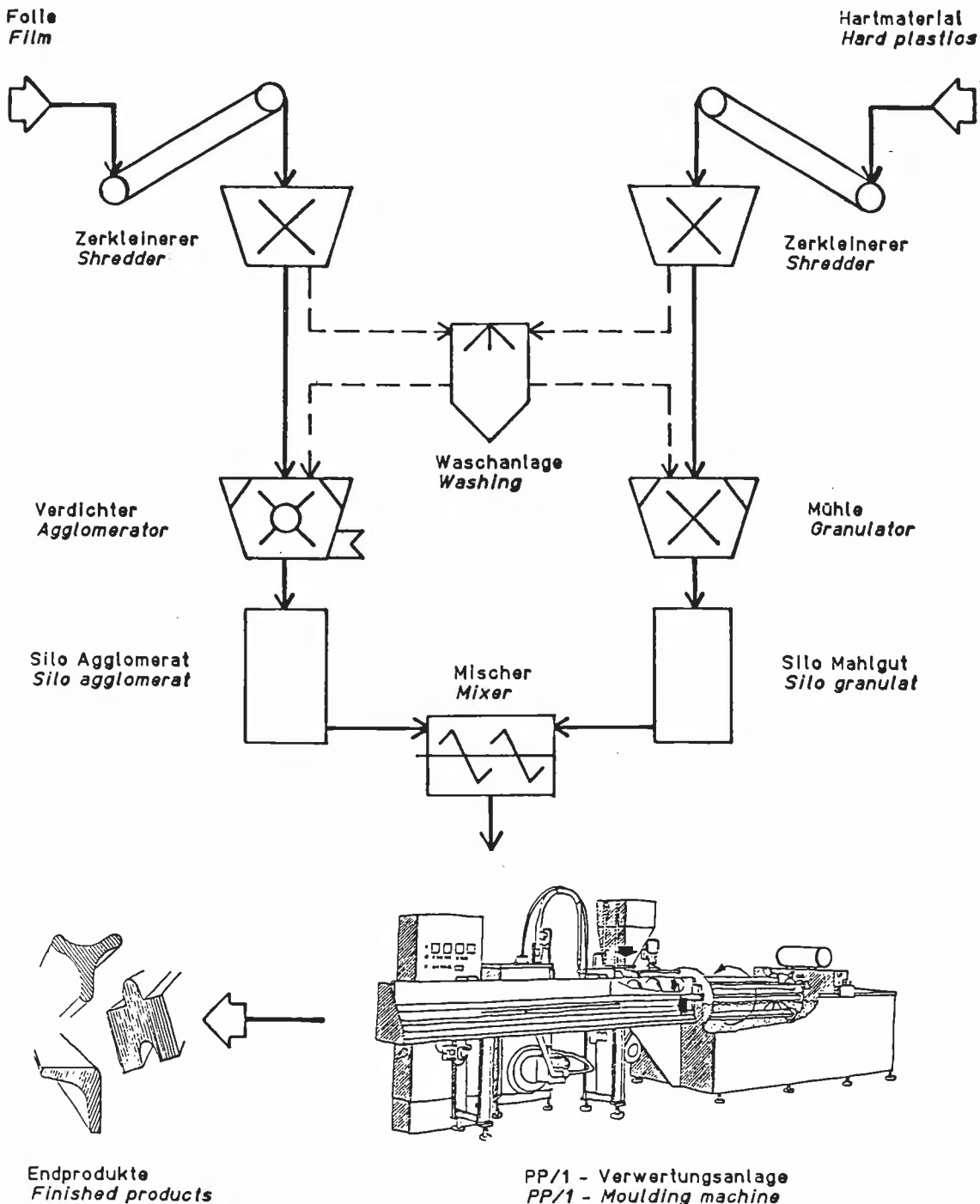
8.5 REAL [118]

Anbieter: Real GmbH
Postfach
D-8717 Mainbernheim
Tel.: (0 93 23) 35 25
Fax.: (0 93 23) 55 22

Verfahrensbeschreibung

Das Rohmaterial wird zunächst zerkleinert und gesiebt, um Schmutzstoffe (harte oder abrasive Material-

Bild 8.7 Aufbereitungsanlage der Fa. Real für Kunststoffe aus Hausmüll



lien) zu entfernen. In einem nachgeschalteten Magnetscheider werden eisenhaltige Verschmutzungen abgetrennt (Bild 8.7).

Beim Einsatz von stark verunreinigten Kunststoffabfällen (z.B. aus Hausmüll) wird das Material nach der Vorzerkleinerung durch ein einfaches Wasch- und Trocknungssystem geleitet, auf das im allgemeinen eine Verdichtung der leichten Fraktion folgt.

In einer zweiten Zerkleinerungsstufe (Schneidmühle) wird das Material auf die erforderliche Korngröße

nachzerkleinert. Das aus der Nachzerkleinerung bzw. Verdichtung anfallende Vorprodukt wird in Reihensilos oder Behältern gelagert.

Nach dem Austrag aus dem Silo wird das Rohmaterial in einem muldenförmigen Mischer homogenisiert, der gleichzeitig als Beschickungssilo für den Extruder dient. Die Mischereinheiten können mit Heißlufttrockenanlagen ausgerüstet werden. Diese sind erforderlich, wenn das Rohmaterial einen Wassergehalt $> 1\%$ aufweist.

Verschiedene Zuschlagstoffe (z.B. Farben) können der Mischung während der Homogenisierung zugeführt werden. Das Entleeren des Rohmaterials vom Mischer in die Formmaschine wird automatisch durch einen Niveauschalter im Aufgabetrichter gesteuert. Zwischen Mischeraustrag und Aufgabetrichter ist zusätzlich ein Magnetscheider eingebaut.

Der Extruder plastifiziert und homogenisiert das Material und drückt das Schmelzgut in entsprechende Gießformen. Die Formen werden im allgemeinen aus Hohlstahlprofilen, wie zum Beispiel Standardstahlrohren oder Platten, hergestellt.

Die Gießformen sind auf einem revolverförmigen Formenträger montiert, der um eine Horizontalachse in einem Kühltank rotiert. Das Kühlwasser wird im Kreislauf geführt. Der Kühltank kann mit einem außenliegenden Kühler oder einem Kühlturm ausgestattet werden.

Der Arbeitszyklus ist wie folgt:

- Füllung: Die Form wird fest gegen den Extruder gehalten, während diese vom Schmelzgut gefüllt wird.
- Stabilisierung: Sobald die Form gefüllt ist, dreht sich der Formträger, so daß die Form in die "Stabilisierungs"-Position noch außerhalb des Wasserbades kommt.
- Kühlphase: Während der Verfüllung der anderen Gießformen, rotiert die gefüllte Form durch das Kühlwasser.
- Abzug: Nach dem Auftauchen aus dem Kühlwasser wird das Formenteil pneumatisch aus der Form ausgestoßen und fällt in einen Aufnahmebehälter. Bis zur endgültigen Abkühlung wird der Formkörper 6 bis 8 Stunden zwischengelagert.

Die Anlage ist nach dem Baukastenprinzip aufgebaut und ist sowohl als stationäre als auch als mobile Anlage lieferbar. Bei der mobilen Anlage werden die Aggregate in Baugruppen zusammengefaßt und in vier 12 m langen Containern untergebracht. Art und Umfang (Durchsatz) der Aufbereitung läßt sich auch bei der mobilen Anlage den Erfordernissen anpassen.

Materialbilanz

Als Rohmaterialquellen sind nach Herstellerangaben geeignet

- Industrieabfälle aus der
- Verpackungsindustrie,
- Automobil- und -zubehörindustrie,
- Kunststoffwiederverwertungsbranche,
- Kunststoffe aus Hausmüll.

Energiebilanz

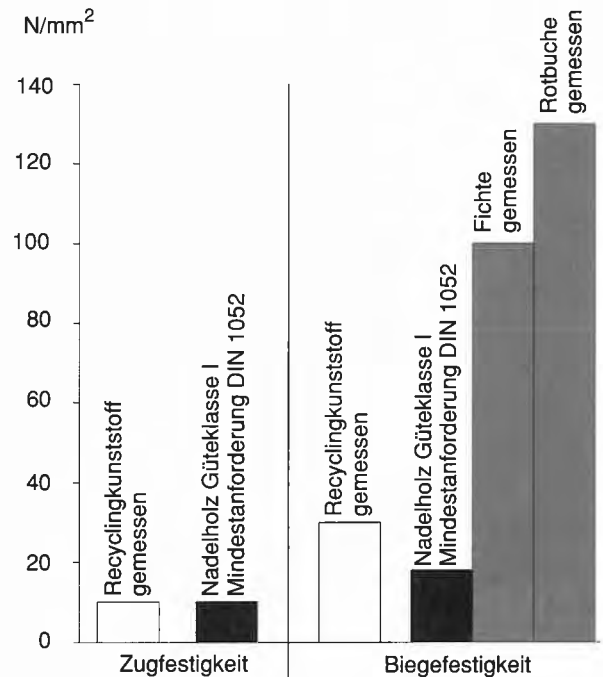
Installierte elektr. Leistung: 325 kW bei 350 kg/h

Verbrauchte elektr. Energie: 260 kWh bei 350 kg

Produkteigenschaften

Auf der Anlage werden Pfosten, Masten, Pfähle, Leisten etc. hergestellt, bei denen die Länge im Verhältnis zum Querschnitt groß ist, und bei denen der Querschnitt entweder konstant ist oder nur in einer Rich-

Bild 8.8 Zug- und Biegefestigkeit von Kunststoff-Recycling-Produkten im Vergleich mit Nadelholz [14]



tung verjüngt wird. Je nach Anforderungen des Marktes und technischen Einschränkungen der Materialien und Gießformen sind quadratische, runde, rechteckige, ovale, trapezförmige oder unregelmäßig Querschnitte möglich.

Die herstellbare Länge reicht von 1 bis zu 4 m. Die Querschnitte variieren von einem Stab von 25 mm Durchmesser bis zu einem Pfeiler von 17 x 17 cm.

Das Produkt hat Bearbeitungseigenschaften, die denen von Holz sehr ähnlich sind, so daß die Produkte mit herkömmlichen Holzbearbeitungsmaschinen oder -werkzeugen bearbeitet werden können. Bild 8.8 zeigt Zug- und Biegefestigkeit von Kunststoffrecycling-Produkten im Vergleich mit Nadelholz.

Wirtschaftlichkeit

Produktionskosten

A = tägl. Betriebszeit	16 Std
B = Produktionsmenge	300 kg
C = Anzahl Personal	pro Schicht 2
D = Stundenlohn	35 DM
E = el. Verbrauch	236 kWh
F = el. Kosten	0,25 DM/kWh

$$\text{Energiekosten/kg} = \frac{E \cdot 236 \cdot F \cdot 0,25}{B \cdot 350} = 0,19 \text{ DM/kg}$$

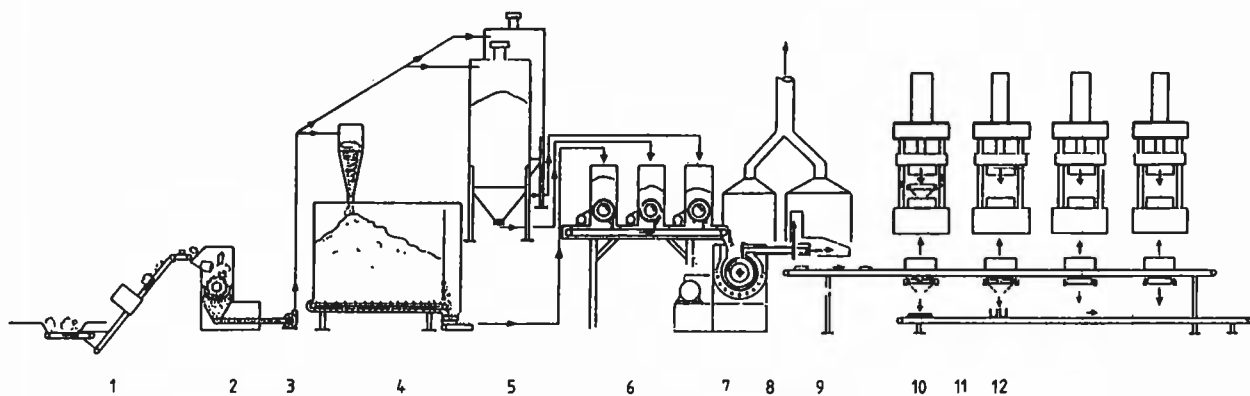
$$\text{Personalkosten} = \frac{C \cdot 3 \cdot D \cdot 35}{B \cdot 300} = 0,30 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Verschleißkosten} = 0,11 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Administration und Verkauf} = 0,04 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Summe Produktionskosten} = 0,64 \text{ DM/kg}$$

Bild 8.9: Aufbereitungsverfahren der Fa. Recycloplast für Kunststoffabfälle



- | | | |
|--|---|-------------------------------------|
| 1 Mühlenbeschickung mit Metallseparation | 5 mech. Förderung | 9 Plastifikat-Dosierung |
| 2 Schneidmühle | 6 Dosiereinheit mit Zentralschleusen | 10 Autom. Pressebeschickung |
| 3 Absauggebläse | 7 Plastifikator | 11 Pressen mit gekühlten Werkzeugen |
| 4 Silo-/Containerlagerung | 8 Entgasungseinrichtung/ Rauchgas-Wäscher | 12 Autom. Pressenentnahme |

Investitionskosten und Abschreibung

A = Investition Maschinen	DM	1.500.000,-
B = Investition Gebäude	DM	20.000,-
C = Jahresproduktion	kg	960.000,-
D = Kapitalzins	8 %	
E = Abschreibung Maschinen	7 Jahre	
F = Abschreibung Gebäude	15 Jahre	

Kapitalabhängige Kosten

$$\text{Kapitalzins} = \frac{(A + B) \cdot D}{C \cdot 100} = \frac{(1.500.000 + 20.000) \cdot 8}{960.000 \cdot 100} = 0,13 \text{ DM/kg}$$

Abschreibung

$$\text{Maschinen} = \frac{A}{E \cdot C} = \frac{1.500.000}{7 \cdot 960.000} = 0,22 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Gebäude} = \frac{B}{F \cdot C} = \frac{20.000}{15 \cdot 960.000} = 0,01 \text{ DM/kg}$$

Summe Investition und Abschreibung	0,36 DM/kg
Summe Produktionskosten	0,64 DM/kg
Summe Betriebskosten	1,00 DM/kg
Verkaufspreis	1,85 DM/kg
Gewinn	1,85 DM/kg
Gewinn pro Jahr	816.000 DM

Entwicklungsstand

Referenzanlagen in der Bundesrepublik Deutschland:

- Städtereinigung Nord, Flensburg;
- Fritz oHG, Dietzhölztal;
- Pfitzenmeier + Rau, Knittlingen;
- MP, Langen.

8.6 Recycloplast [119]

Anbieter: Recycloplast AG
8195 Egling Neukolbing 1
Tel.: (0 81 76) 5 21

Verfahrensbeschreibung

Die Kunststoffabfälle werden in einer Schneidmühle zerkleinert, in Vorratssilos oder Container befördert und in die jeweiligen Dosiereinheiten transportiert (Bild 8.9).

Die kontinuierliche Plastifikatoren-Beschickung auf der gesamten Walzenlänge wird durch ein entsprechend breites Dosierband erreicht.

Im Walzenplastifikator werden die thermoplastischen Kunststoffe und Zusatzstoffe durch Friktionswärme bei ca. 200 °C aufgeschmolzen und in mehreren Komprimier- und Entspannungszonen knetend homogen vermischt.

Der Anteil der Thermoplaste kann durch Beimischen von Primärkunststoffen verändert werden. Zusätzlich können über die Dosiergeräte Farben, Füllstoffe und sonstige Zuschläge in das Gemisch eingebracht werden.

Eventuell freiwerdende Dämpfe, Gase und Staubpartikel werden mittels einer Rauchgas-Waschanlage gereinigt und neutralisiert. Eine automatisch einstellbare Schabevorrichtung (Rakel) streift die homogen aufgeschmolzene Kunststoffmasse von der Walze und drückt diese in eine beheizte Düse. Als Plastifikatstrang tritt die Kunststoffmasse aus.

Der Plastifikatstrang wird portioniert und den Preßformen übergeben. Die Kunststoffmasse wird unter hohem Druck verformt, gekühlt und als fertig geformte Produkte den hydraulischen Säulenpressen entnommen.

Die Möglichkeit einer Verarbeitung des Recycloplasti-

fikats in rieselfähiges Granulat ist je nach Bedarf des Anlagebetreibers durch einen nachgeschalteten Heißabschlag realisierbar. Das Granulat kann dann sofort in Spritzgußmaschinen weiterverarbeitet oder als Sack- oder Siloware verwendet werden.

Materialbilanz

Der Durchsatz der Anlage beträgt 0,5 – 1 Mg/h entsprechend 2.500 – 3.000 Mg/a bei 0,5 Mg/h und 3 Schichten.

Entwicklungsstand

Referenzanlagen:

- Recycloplast, Neukolbing seit Nov. 1983;
- Remaplan, München seit 1986;
- Recyclen, Osterburken seit 1987;
- 3 Anlagen in den USA und der Schweiz.

Das Unternehmen befindet sich in Konkurs.

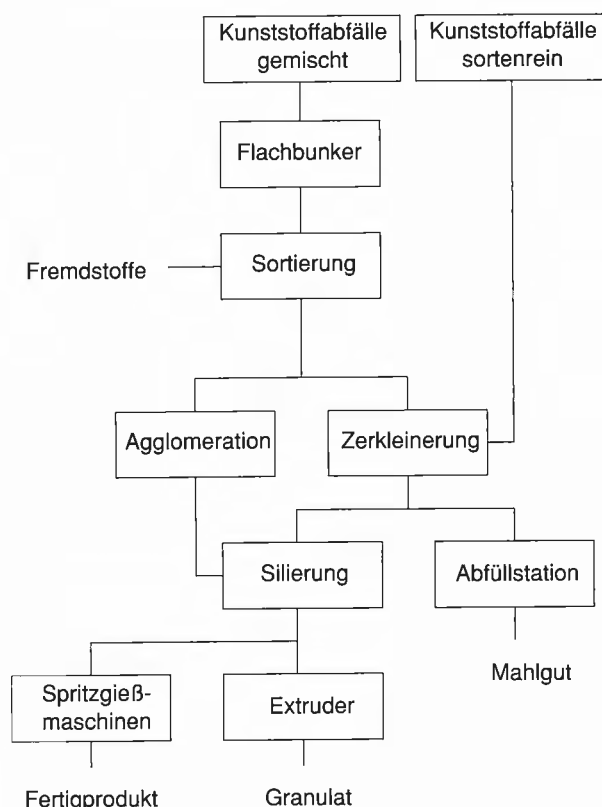
8.7 RGR [123]

Anbieter: Recycling Gesellschaft für Rohstoffrückgewinnung mbH & Co (ALBA)
Flottenstr. 7-8
D-1000 Berlin 51
Tel.: (030) 40 90 7-0

Verfahrensbeschreibung

Die Anlage verarbeitet sortenreine und gemischte

Bild 8.10 Verfahrensschema der Kunststoffaufbereitung der Fa. RGR



Kunststoffabfälle (Hart- und Weichkunststoffe), soweit diese weitgehend unverschmutzt sind (Bild 8.10).

Nach der Anlieferung erfolgt im Flachbunker eine Abtrennung von Fremd- und Störstoffen sowie ggf. eine Sortentrennung. Danach werden die Hartkunststoffe in einer Schneidmühle zerkleinert. Je nach Bedarf besteht anschließend die Möglichkeit, das Material als Mahlgut abzapfen oder nach einer Zwischenlagerung in einem Extruder mit Kaltabschlag (Stranggarnulierung) zu Granulat weiterzuverarbeiten. Aussortierte Folien werden in einem Agglomerator behandelt. Aus einem Teil des Mahlgutes werden auf einer Spritzgußmaschine Fertigprodukte hergestellt.

Materialbilanz

Der Durchsatz der Anlage beträgt je nach Material zwischen 250 und 750 kg/h.

Energiebilanz

Die installierte Leistung der Anlage beläuft sich auf 350 kW.

Produkteigenschaften

Es werden marktgängige Regranulate und Mahlgüter sowie ggf. Fertigprodukte hergestellt.

Wirtschaftlichkeit

Die spezifischen Kosten betragen je nach Fertigungstiefe zwischen 0,50 – 1,00 DM/kg Fertigprodukt.

Entwicklungsstand

Die Anlage ist seit Mitte 1984 in Betrieb.

8.8 Wormser Kunststoffrecycling [154]

Anbieter: Wormser Kunststoffrecycling GmbH
Klosterstraße 22
D-6520 Worms
Tel.: 06247/6171

Verfahrensbeschreibung

Das Aufbereitungsverfahren ist zur Herstellung von Polyolefin- und PVC-Produkten konzipiert. Die vermischten und verschmutzten Altkunststoffe werden ohne Abtrennung von Verunreinigungen verarbeitet. Voraussetzung ist jedoch ein Mindestanteil an Kunststoff von 80 % (Bild 8.11).

Die Altkunststoffe werden auf eine Korngröße von ca. 6mm zerkleinert und über einen Walzenextruder plastifiziert. Die Herstellung der Formkörper erfolgt entweder im Spritzguß- oder Spritzpreß-Verfahren.

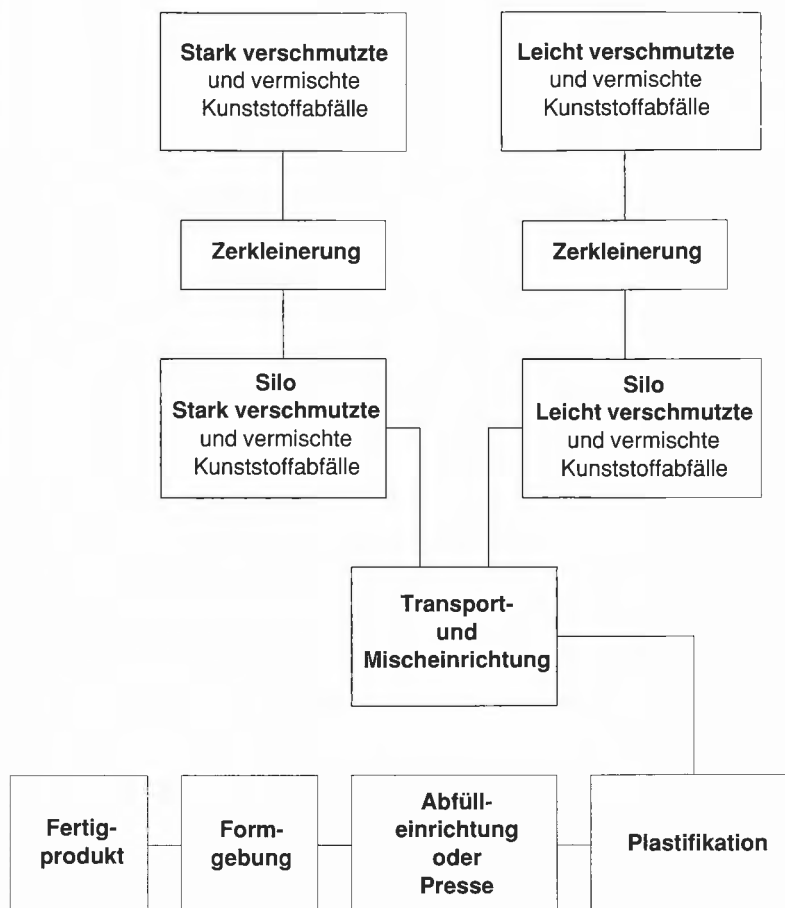
Eine spezielle Abfülleinrichtung sorgt für einen kontinuierlichen Wechsel der gefüllten Formen gegen leere Formen (bzw. Lauf des Extruders). Der Formenwechsel erfolgt bei laufendem Extruder.

Nach Abkühlung kann das Produkt der Form entnommen werden (Entformstation).

Materialbilanz

Der Durchsatz der Anlage beträgt 0,6 Mg/h entspre-

Bild 8.11 Aufbereitungsverfahren der Fa. WKR



chend 1.200 Mg/a. Dieser soll auf 6.000 Mg/a erweitert werden.

Energiebilanz

Die installierte elektrische Leistung liegt bei 70 kW. Die installierte Heizleistung beträgt 100 kW.

Produkteigenschaften

Mit den Produkten aus Recycling-Kunststoff sollen Rohstoffe wie tropische Harthölzer, Beton und Metall substituiert werden. Hergestellt werden u.a. Rasengitter, Palisaden, Blumenkübel, Gartenmöbel, Begrenzungspfähle und Bakenfüße (Bild 8.12). Beim herkömmlichen Spritzpressen können Formkörper mit Wandstärken von ca. 10 mm erreicht werden, während beim Spritzgießen z.Zt. die Wandstärkeuntergrenze bei 60 mm liegt.

Wirtschaftlichkeit

Als Eckdaten für eine Anlage zur Entsorgung eines Einzugsgebietes von ca. 80 000 Einwohnern zzgl. Kunststoffen aus Gewerbeabfällen werden genannt:

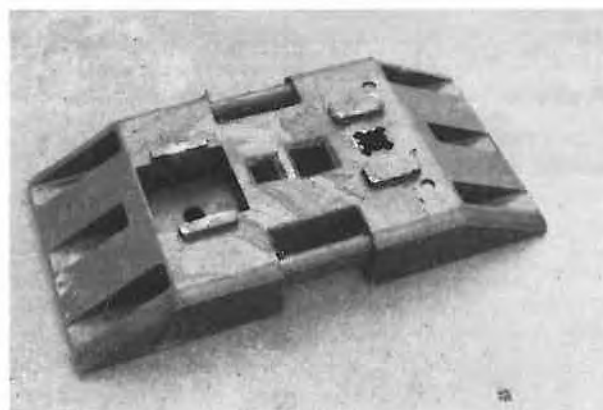
1 Extruder mit Direktabfüllverfahren u. Entformstation:	ca. 500.000,-DM
Bedienungspersonal:	2 Mann
Platzbedarf:	200 m ² überdacht
500 m ² Freigelände	

Zerkleinerungskosten:	0,35 – 0,50 DM/kg
Aufbereitungskosten:	0,75 – 0,80 DM/kg
Erlös:	1,20 – 1,40 DM/kg

8.9 Zusammenstellung der Verfahren

Die Zusammenstellung der Verfahren zur Aufbereitung von Kunststoffabfällen aus Hausmüll und Gewerbeabfällen zeigt Tabelle 8.3

Bild 8.12: Bakenfuß aus Recyclingkunststoff hergestellt im Spritzpreßverfahren



**Tabelle 8.3 Zusammenstellung der Aufbereitungsverfahren für Kunststoffabfälle aus Haus- und Gewer-
bemüll**

Anbieter	Einsatzstoffe	Produkte	Verfahrensschritte (Erläuterungen s. u.)	Durchsatz [kg/h]	Energiebedarf [kWh/Mg]	Kosten [DM/Mg] oder [DM/a]
AKW	verschmutzte, vermischte Kunststoffe	hochwertiges PE-Granulat	1, 2, 4, 8, 9, 10 stationäre Anlage	1.000	750	3 Schicht: 600,-
ENTEC	verschmutzte Folien	hochwertiges PE-Granulat	1, 2, 4, 5, 4, 8, 10 stationäre Anlage	1.000	600	3 Schicht: 400,- 700,-
REFAKT	verschmutzte PE-Abfälle, verm. Kunstst.	hochwertige PE-Schnitzel	1, 3, 2, 4, 5, 7, 4, 6, 8, 9 stationäre Anlage	500 – 1000	150 – 300 1, 2)	1 Schicht, 100 kg/h: Aufbereitung: 300 – 500 Extrusion: 200 – 300
Thyssen Henschel	verschmutzte, vermischte Thermoplaste	PE-, PS-, PVC-Granulat, Al	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 stationäre Anlage	300 – 500	keine Angabe	Invest.: 800.000,- Betriebskosten: 300.000,-
Real	verschmutzte, vermischte Kunststoffe	dickwandige Produkte, Profile	1, 3, 8, 9, 10 stationäre und mobile Anlage	150 – 900	740	1 Schicht: 980,-
Recycloplast	verschmutzte, vermischte Kunststoffe	dickwandige Produkte	3, 1, 10, 11 stationäre Anlage	500 – 1000	300 – 600	keine Angaben
RGR	sortenreine, vermischte Kunststoffe	Mahlgut/ hochwertiges Granulat	1, (10)	250 – 750	850 – 2500	500,- bis 1000,-
WKR	verschmutzte, vermischte Kunststoffe	dickwandig, f. Straßen- u. Gartenbau	1, 10, 11 stationäre Anlage	300	340 1)	1 Schicht, nur Zerkleinerung: 280 – 320,-
Verfahrensschritte:			4 Hydrozyklon	8 Trockner (mech./therm.)	1) o. Plastifi.	Afa/Personal/Energie,
1 Zerkleinerung			5 Schwimm-Sink-Scheider	9 Homogenisierung	2) 60 % der	jedoch o. Rohstoff-
2 Naßzerkleinerung			6 Siebung	10 Plastifizierung	install.	kosten
3 Magnetscheider			7 Wäscher	11 Produktherstellung	Leistung	

8.10 Weitere Verfahren

Revive System [122]

Anbieter: CADAUTA s.a.s.
Ing. R. Fornasero
Via Torino
I-10020 – San Sebastiano da Po
Torino Italien
Tel.: 00391/919 12 84

Anwendungsgebiete

Behandelt werden verschmutzte, gemischte Kunststoffabfälle ohne Vorsortierung sowie Verbundmaterialien.

Produkte

Durch Kompaktierung und Verpressen der Kunststoffabfälle in Formpressen werden Blöcke für Fahrbahnen, Zaunpfähle und Straßenbauprodukte hergestellt.

Nach Aufbereitung und Granulierung werden durch Extrusion Profile, Platten, Rohrleitungen, durch Spritzguß Behälter, Kisten etc. hergestellt. Darüberhinaus werden strukturelle Schaumkunststoffe für Isoliermaterial, Behälter etc. produziert. Die technischen Eigenschaften der Produkte wurden untersucht und ergaben gute Produkteigenschaften.

Wirtschaftlichkeit

Firmeneigene Ermittlungen der Energiekosten und der wirtschaftlichen Kosten zeigen eine positive Bilanz.

Entwicklungsstand

Revive-System wird mit Forschungsgeldern der EG gefördert. Eine Pilotanlage mit einem Jahresdurchsatz von 1 Mg für das Recycling von heterogenen Kunststoffabfällen ist in Betrieb, die Produkte werden vor Ort verkauft. Es werden komplette Anlagen und Lizenzen für das Revive-System angeboten.

In Bild 8.13 ist das Verfahren der Aufbereitung und die Produktion schematisch dargestellt.

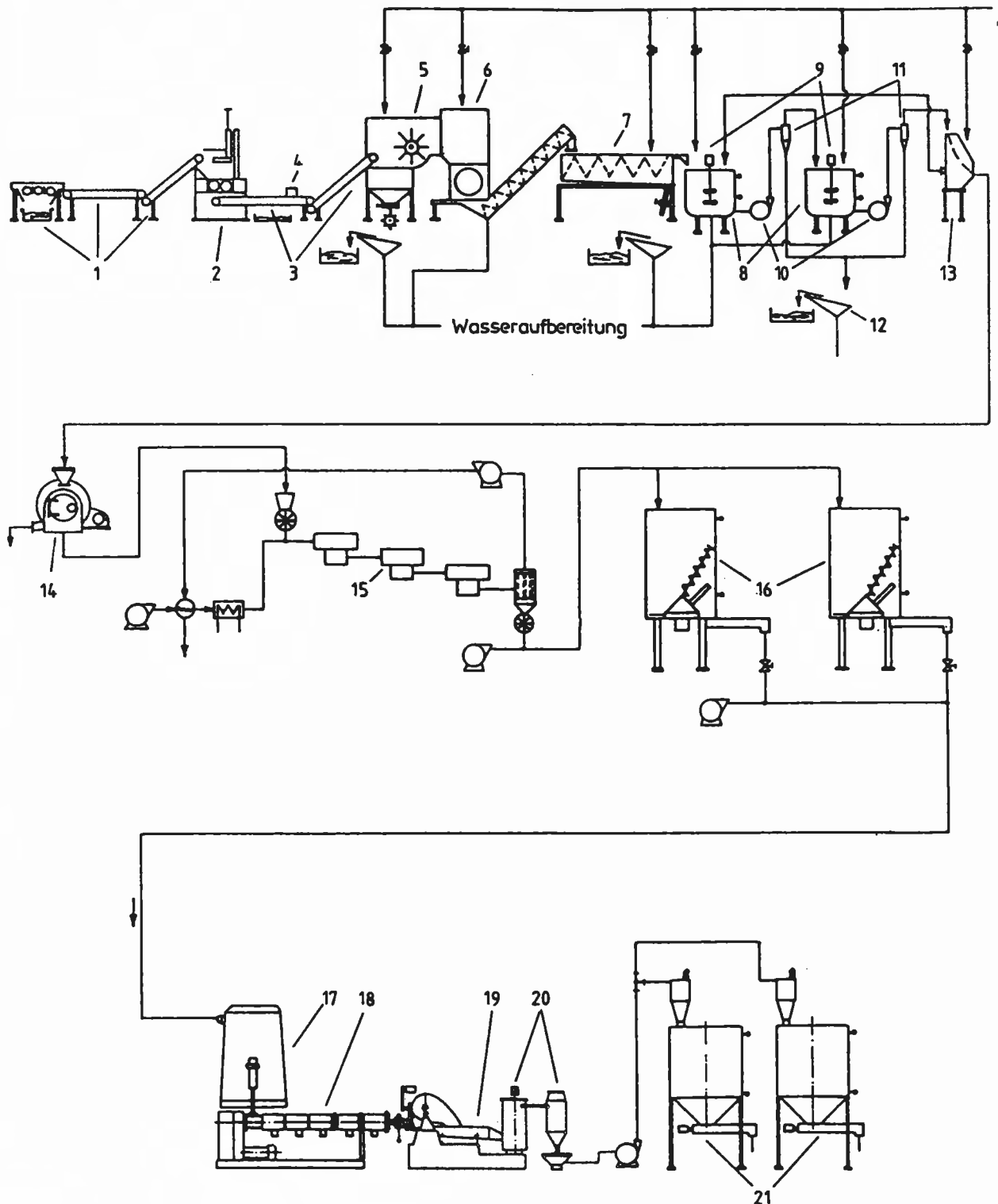
Uniplast-Verfahren [72]

Anbieter: Greiner- Uniplast
Auern 100
A-4552 Wartberg/Krems
Österreich

Anwendungsgebiete

Bearbeitet werden verschmutzte, heterogene Kunststoffabfälle.

Bild 8.13: Verfahrensfließbild Revive-System Italien



Verfahren

Das Verfahren besteht aus einer Homogenisierung der heterogenen Kunststoffmasse bei relativ geringer Temperatur und einem speziellen Masse-Aufbereitungsverfahren, unter Einschluß verbleibender harter Teilchen.

Produkte

Es werden dünnwandige Hohlprofile hergestellt. Die folgenden Angaben zu Unternehmen in Großbritannien sind [75] entnommen. In Großbritannien informiert das RAU (Department of Trade and Industry's Recycling Advisory Unit, Warren Spring Laboratory)

des Ministeriums für Handel und Industrie u.a. über den Stand der Forschung und Entwicklung im Bereich Recyclingtechniken für Kunststoffabfälle und Verbundwerkstoffe.

Braithwaite Plastics U.K.

Anbieter: Braithwaite Plastics Ltd.
60 Blackpool Trading Estate
Worcester
United Kingdom
R3 8SQ

Anwendungsgebiete

Braithwaite Plastics produziert „Stockbord“, ein Produkt aus LDPE-Folienabfällen. Diese treten in verschiedenen Formen auf: als Folie (Beutel, lose Verpackungen, Besäumabfälle), Flocken (verunreinigtes Material aus der Verarbeitung) oder als Pulver (verunreinigtes Material aus der Polymerverarbeitung). Laut Braithwaite akzeptiert das Verfahren bis zu 15 % Verunreinigungen wie Papier, Pappe, Schmutz und Öl.

Verfahren

Das Material wird in Streifen geschnitten und eisenhaltige Bestandteile durch Magnet entfernt. Im Anschluß an die Drucklufttrocknung wird das vorzerkleinerte Material granuliert und durch eine Wirbelstromspule geleitet, die einen Abscheider betätigt, um NE-Metalle automatisch aus dem Prozeß zu entfernen.

Das Granulat wird in einem Extruder zu einer teigigen Masse geschmolzen, die in einem Wasserbad abgeschreckt und erneut granuliert wird. Alternativ wird das Granulat in einer Ringesenkmühle zusammengeballt, gemahlen und zusammen mit den Schnitzeln in Silos gelagert.

Verdichtetes Material wird durch Schneckenförderer aus den Silos gezogen und gemischt. Eine 75 mm dicke Schicht, je nach Anforderung an die Produktdicke, wird auf ein Trägermaterial aufgetragen und bei 200 – 198 °C durch einen Ofen geleitet. Der Kunststoff schmilzt, und beim Verlassen des Ofens sind die vorgefertigten Platten mit einer Folienschicht abgedichtet und gefestigt.

Die fertigen Platten kühlen auf einem Drahtgurtförderer aus und werden auf die richtige Größe geschnitten. Besäumabfälle werden wieder granuliert und erneut verwendet.

Produkte

Stockbord wird in zwei Versionen hergestellt: mit einer geprägten Oberflächenstruktur und als E-Bord mit einer glatten glänzenden Oberfläche. Es wird beispielsweise als industrieller Bodenbelag verwendet, der gegen anorganische Chemikalien beständig ist, sowie als Ummantelung elektrischer Kabel.

In Landwirtschaft und Gartenbau hat das Material den Vorteil, daß es haltbar, verformbar, fäulnisbeständig, ungiftig, hygienisch und wartungsfrei ist. Versuche wurden auch mit anderen Kunststoffen wie HDPE und

PP sowie der Verwendung von Calciumcarbonat als Füllstoff durchgeführt.

Plastech Ltd., Sempol Ltd. U.K.

Anbieter: Plastech Ltd.
Brook House
449 Brooklane
Moseley, Birmingham
United Kingdom
B13 0BT

Anwendungsgebiet

Plastech Ltd. hat ein Verfahren zur Rückgewinnung von Polyethylenterephthalat (PETP) aus gemischten Kunststoffabfällen angekündigt.

Verfahren

In Hydrozyklonen erfolgt eine erste Materialtrennung. Ein modulares Verarbeitungssystem, das in verschiedenen Versionen verfügbar ist, kann speziellen Anforderungen an Ausgangsmaterial und Produkt gerecht werden.

Entwicklungsstand

Eine Pilotanlage wird bei der Tochterfirma Sempol Products Ltd. betrieben. Das Verfahren umfaßt Zerkleinerung und Entfernung von Verunreinigungen, anschließende Extrusion und Granulation.

Cookson Industrial Materials Ltd. U.K. und USA

Anbieter: Cookson Industrial Materials Ltd.
Crescent House
Newcastle-on-Tyne
United Kingdom
NE99 1GE

Tochterfirmen:

Pichborn Plastics Ltd.
Monmouth Plastics, New Jersey USA

Anwendungsgebiete

Mit dem Verfahren werden sortenreine PP-Kunststoffabfälle, vorwiegend gewerbliche Produktionsabfälle, verarbeitet.

Produkte

Die Produktpalette umfaßt Copolymere für Spritzguß, mineralien- und glasfaserverstärkte Homo/Copolymer-Verbindungen, Blasfolie und Beutel. Die Copolymere A und B wurden vom britischen National Water Council zum Bau von Wassertanks zugelassen. Die Produkte können eine steigende Akzeptanz auf verschiedenen Märkten verzeichnen.

Alida Packaging U.K.

Anbieter: Alida Packaging Ltd.
Heanor Gate, Heanor
Derbyshire
United Kingdom
DE7 7RG

Anwendungsgebiete

Alida verarbeitet seit 1981 über 8.000 Mg Polyethylenabfall im Jahr. Bevorzugte Ausgangsmaterialien sind Produktionsabfälle, Getränkekästen, saubere Verpackungsbeutel und Palettenschumpffolie.

Verfahren

Das eingehende Material wird genau untersucht, verschmutzte Teile werden aussortiert. Dann wird es zerkleinert, extrudiert und portionsweise granuliert, damit unterschiedliche Polymergüten und -farben nicht gemischt werden. Zur Erfüllung bestimmter Spezifikationen werden Stabilisatoren eingesetzt.

Produkte

Das Granulat wird verkauft oder von Alida zu Müllsäcken verarbeitet. Außerdem hat die Firma Wiederaufbereitungstechniken für andere Polymere wie Polypropylen, Polysterol und Nylonarten entwickelt.

Rensselaer Polytechnic Institute USA

Forschung und Entwicklung: Rensselaer Polytechnic Institute
Mr. Bruce Naumann
Troy
New York State
USA

Verfahren

Das Verfahren basiert auf dem System der selektiven Lösung von Kunststoffen. In einem präzise vorausberechneten Verfahren werden klein geschrotete und aus verschiedenen Polymeren bestehende Abfälle in hermetisch geschlossenen Behältern mit dem geeigneten Lösungsmittel bei unterschiedlichen Temperatur- und Druckbedingungen vermischt. Das Lösungsmittel löst jeweils nur einen Kunststoff auf und gibt ihn unter geänderten Temperatur- und Druckverhältnissen wieder ab. Stoffe wie PVC, Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und selbst Polyterephthalate können in reiner Form zurückgewonnen werden. Die Lösungsmittel verbleiben nach einer Reinigung im Prozeß und werden wiederverwendet. Als Lösungsmittel dienen organische Verbindungen wie chlorierte Kohlenwasserstoffe, Xylene oder Tetrahydrofurane [83].

Anwendungsgebiete

Für das Verfahren werden gereinigte, vermischte, kleingeschrotete Abfälle aus Polyolfinen eingesetzt.

Entwicklungsstand

Z.Zt. wird eine Laboranlage mit einem Durchsatz von bis zu 25 Mg/d betrieben. Das Verfahren wird durch Patente geschützt.

Wirtschaftlichkeit

Nach Angaben des Forschungsinstitutes werden erste Kalkulationsberechnungen anhand der Laboranlage erstellt. Dabei wurde ein Preisvorteil der recycelten Kunststoffe gegenüber den Neuprodukten von 30 % ermittelt.

Die Umsetzung des Verfahrens vom Labormaßstab zur großtechnischen Anlage erfordert erfahrungsgemäß einen Forschungs- und Entwicklungszeitrahmen von etwa 10 Jahren. Bundesdeutsche Unternehmen wie Bayer, Hoechst und BASF stehen dem Verfahren aus Gründen der Wirtschaftlichkeit skeptisch gegenüber [83].

Weitere Anbieter von Aufbereitungsanlagen und Ausrüstungen sind:

– Advanced Recycling Technology (ART)

Industrielaan 4
B-9660 Braakel
Belgium

– Hammer's Plastic Recycling Cooperation

RR3 Box 182
Highway 20 and 65 North
Iowa Falls, IA 50 126
USA

– IBI – Gesellschaft für internationale Bau- und Industrieberatung

Rosenheimer Landstraße 87
D-8012 Ottobrunn

– Superwood International Ltd.

Corke Abbey
Bray-County Wicklow
Ireland

– Sikoplast Maschinenbau Heinrich Koch GmbH

Postfach 1816
D-5200 Siegburg

9. Ausblick

In der Bundesrepublik Deutschland sind gegenwärtig ca. 45 Mio Mg Kunststoffe – bei weiterhin steigender Tendenz – im Umlauf, die innerhalb der kommenden Jahre und Jahrzehnte zu Abfall werden.

1989 wurden etwa 9 Mio Mg Kunststoffe produziert. Durch die Be- und Verarbeitung von Kunststoffen sowie durch den Konsum insbesondere von Verpackungsmaterialien entstanden ca. 2,2 Mio Mg Kunststoffabfälle. Davon wurden ca. 500.000 Mg sortenreine Abfälle und 15.000 vermischte Abfälle aus Haushalten recycelt.

Vorwiegend verwertbar sind sortenreine Kunststoffe aus dem kunststoffbe- und -verarbeitenden Gewerbe, wobei das innerbetriebliche Recycling zur Zeit statistisch nicht erfaßt aber in erheblichem Umfang praktiziert wird. Die gemischten Kunststoffe aus den Haushalten betragen nach Schätzungen jährlich ca. 1,30 Mio Mg und werden kaum wiederverwertet. Im Rahmen der öffentlichen Abfallentsorgung wurde im Jahr 1987 7.743 Mg Kunststoffabfälle getrennt gesammelt und verwertet.

Kunststoffabfälle können, wie die Untersuchungen in Hamburg, Berlin etc. gezeigt haben, besonders gut in den Ballungsgebieten sowie in Gewerbebetrieben verstärkt erfaßt werden. Für diese Gebiete läßt sich – gemäß der Daten von 1986 – für die alten Bundesländer ein erfaßbares Potential von 0,6 Mio Mg an Kunststoffabfällen abschätzen. Die hohen Sammelkosten und die geringen Aufbereitungskapazitäten verhindern jedoch bislang die kontinuierliche Erfassung dieses Potentials.

Der Kunststoffabfall im Haus-, Sperr- und Gewebemüll wird bis zum Jahre 2000 auf ca. 3 Mio Mg anwachsen, da in Zukunft langlebige Produkte einen größeren Anteil am Abfall ausmachen werden. Logistik, Verfahrenstechnik und Marketing müssen daher verstärkt eingesetzt werden, um in Zukunft diese wertvollen Reststoffe sinnvoll zu nutzen und das Deponievolumen zu entlasten.

Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigten, daß Massenware aus Recyclingkunststoffen wie Backenfüße, Pfähle, Zaunlatten, Blumenkästen, kostendeckend produziert werden können und daß hier Absatzmöglichkeiten geschaffen wurden und auch erweiterbar sind. Dieser Produktbereich bietet jedoch nur geringe Innovationsmöglichkeiten und kann das gegenwärtige und zukünftige Kunststoffverwertungspotential nicht ausschöpfen.

Zwar gibt es theoretisch weitere geeignete Einsatzbereiche, etwa im Bauwesen, aber ein gezieltes Marketing für Kunststoffrecyclingprodukte ist erst in Ansätzen zu beobachten. Mehrere Gründe spielen hier eine Rolle:

– Häufig be- oder verhindern Normen, Vorschriften und Ausschreibungsrichtlinien, gerade der öffentli-

chen Stellen, den Recyclat-Einsatz. Eine konsequente Bevorzugung von Recyclaten bei Ausschreibungen und bei der behördeninternen Beschaffung würde den Markt für Recycling-Produkte deutlich vergrößern und weitere Abnehmer nach sich ziehen (Vorreiterrolle des Staates).

- Die Qualitätsanforderungen verschiedener Abnehmer-Industrien, z.B. der Automobil-Industrie, sind überzogen.
- Der Preis für Neuware schwankt und kann dadurch unter den Preis für Recyclat sinken. Der Grund ist darin zu suchen, daß der Preis für Neuware abhängig ist von der weltweiten Produktion und dem Handel und dadurch starken Preisschwankungen ausgesetzt sein kann. Bedingt durch Steigerung der Produktionskapazität mit nachhinkender Nachfrageentwicklung war vom Februar 1989 bis zum Februar 1990 ein Preisverfall von 5 – 27 % je nach Kunststoffsorte zu verzeichnen. Diesen Preisschwankungen können Recycling-Produkte aufgrund ihrer Herkunft und das ökologisch bewußte Marktverhalten der Verbraucher gesetzt werden. Die Erfahrung mit anderen Recyclingprodukten zeigt, daß höhere Preise durchaus in Kauf genommen werden. Darüber hinaus kann damit gerechnet werden, daß durch die Regelungen der Verpackungsverordnung – Rücknahme der Verpackungen, Kosten für Sammlung und Entsorgung werden z.T. auf den Produktpreis umgelegt – Kunststoffabfälle vermehrt sortenrein zur Verfügung stehen und Recyclingprodukte langfristig kostengünstiger hergestellt werden können.

Ein gezieltes Marketing für Kunststoffrecyclingprodukte bietet sich für die folgenden Marktbereiche an:

1. Konsumbereich, Wohnumfeld und Gartenbau
 - Wand- und Deckenprofile
 - Bodenplatten, Abflußrinnen und Möbel
 - Lagerbehälter, Schallschutzwände, Palisadensteine
 - Abfallbehälter, Mülltonnen
2. Straßenbau, Bauhilfsmittel und Rohstoffe
 - Gitterblöcke, Randsteine, Kanalsohlen
 - Betonschalungsplatten, Gerüstbelagsplatten
 - Bitumenersatz bzw. -zuschlagsstoffe
3. Industriebereich
 - Fahrzeug- und Anlagenbau
 - Elektrobereich und Sicherheitstechnik
 - technische Kunststoffe im Umweltschutz
 - Substitution von Sekundärrohstoff
 - physikalisch-chemisches oder chemisches Recycling zur Herstellung von Rohstoffen

Im Folgenden wird das Marktpotential für Recyclingprodukte entsprechend den obigen Marktbereichen

auf der Datenbasis von 1986 dargestellt. Die Angaben stellen eine vorsichtige Schätzung dar, wie diese nach Abschluß einer Einführungsphase und Stabilisierung des Marktgeschehens bei der Substitution von Konkurrenzprodukten vorstellbar wäre:

1. Konsumbereich, Wohnumfeld, Gartenbau
18.500 Mg/a
2. Straßenbau, Bauhilfsmittel und Rohstoffe
80.000 Mg/a
3. Industriebereich (ohne physikalisch-chemisches, chemisches Recycling) 32.000 Mg/a

Die Aufstellung zeigt, daß ca. 130.500 Mg Kunststoffabfälle pro Jahr zu neuen Produkten verarbeitet und abgesetzt werden könnten.

Da das derzeit bestehende und zu erwartende Marktpotential für Recyclingprodukte den gegenwärtig erfaßbaren Altkunststoffanteil von ca. 600.000 Mg/a nur zum Teil nutzen kann, sind Strategien zu entwickeln und Ansätze zur Umsetzung zu fördern um den Überhang an Altkunststoff zu bewältigen. Der verstärkte Anfall an langlebigen Kunststoffprodukten im Abfall in den nächsten Jahre ist dabei zu berücksichtigen.

Über das Umschmelzrecycling sortenreiner oder vermischter Kunststoffe hinaus bieten die verschiedenen Verfahren des physikalisch-chemischen und des chemischen Recycling (Solvolyse, Pyrolyse, Hydrierung) die Möglichkeit, Polymere in reiner Form bzw. deren monomere Grundbausteine (beim chemischen Recycling) zu gewinnen. Diese Polymere bzw. niedermolekularen Grundbausteine können fraktioniert und einer erneuten petrochemischen Produktion zugeführt werden.

Die Herstellung von Einsatzstoffen für die chemische Industrie auf diese Weise erfordert technische Forschungs- und Entwicklungskapazitäten und kann als sogenannte „Regeneratchemie“ gerade für den Aufbau der chemischen Industrie in den neuen Bundesländern zu einem Strukturwandel beitragen.

Die Regeneratchemie ist Bestandteil des sogenannten „erweiterten Kaskadenmodells“ das von der Interdisziplinären Forschungsgemeinschaft Kunststoff, Berlin entwickelt und beschrieben wurde [137]. Dabei wird durch verschiedene Stufen (Kaskaden) des Recycling von Kunststoffprodukten eine möglichst weitgehend geschlossene Kreislauflührung der im Prinzip nicht alternenden Grundbaustoffe des Kunststoffmaterials angestrebt. Die einzelnen Kaskaden lassen sich wie folgt beschreiben.

Ein Kunststoffprodukt wird in Mehrwegsystemen mehrfach genutzt (Produktrecycling), danach erfolgt das Umschmelzen in andere Produkte (Materialrecycling). Dieses Umschmelzrecycling ist mehrmals denkbar:

1. Nutzung für hochwertige, kurzzeitige Anwendung, z.B. Lebensmittelverpackung
2. Nutzung für hochwertige, langzeitige Anwendung, z.B. technische Bauteile (Auto, Haushalt)
- 3.,4.,5.Nutzung denkbar für weitere Anwendungen, z.B. Umverpackungen, Gebrauchsgegenstände

Nach dem Materialrecycling erfolgt die Zerlegung des Kunststoffmaterials in Polymere bzw. in die Grundbausteine mit den verschiedenen Verfahren des physikalisch-chemischen und des chemischen Recycling (Inlösungnahme von gebrauchten und verbrauchten Polymerwerkstoffen, Solvolyse, Thermolyse).

Nach Auffassung der Autoren dieses Modells bietet ein mehrfaches Produktrecycling und anschließendes Materialrecycling entscheidende ökologische Verbesserungen hinsichtlich des Primärenergiebedarfs und der produktionsspezifischen Emissionen. Durch zusätzliches physikalisch-chemisches und chemisches Recycling kann der Werkstoffkreislauf annähernd geschlossen werden.

Insbesondere für die neuen Bundesländer werden für die Entwicklung einer Regeneratchemie gute Realisierungsmöglichkeiten gesehen. Beim anstehenden Strukturwandel von der Carbochemie in eine Petrochemie ist stattdessen der Übergang zur Regeneratchemie denkbar. Für eine solche Umstellung spricht nicht nur die Tatsache, daß eine Petrochemie sich dem starken Wettbewerb im Welthandel aussetzen würde, sondern auch, daß die Art der Verfahrensführung und vor allem die Produkte einer Regeneratchemie denen der Carbochemie entsprechen. Dadurch läßt sich vorhandenes Know-how nutzen, die notwendigen Anlagentechnologien lassen sich teilweise durch Modifikation bestehender chemotechnischer Anlagen aufbauen [137]. Dieses Konzept ist ein interessanter Weg, der weiterverfolgt werden sollte.

Im Ausblick der ersten Auflage dieses Beiheftes wurde die thermische Verwertung der sortenreinen und auch der gemischten Kunststoffabfälle durch Pyrolyse als erfolgversprechende Möglichkeit angesehen. Diese Aussage kann aufrechterhalten werden, muß aber nach den Erfahrungen der letzten Jahre differenzierter betrachtet werden. Die Pyrolyse wird für die Verwertung von Kunststoffabfällen derzeit nicht eingesetzt. Mehrere Gründe spielen dafür eine Rolle:

- Die Anlagen können mit den entstehenden Aufbereitungskosten von ca. 200,- DM/Mg nicht wirtschaftlich betrieben werden. An Pyrolyseanlagen zur Verwertung von Kunststoffabfällen angeliefertes Material muß daher mit einer entsprechenden Entsorgungsgebühr belegt werden.
- Der Anteil chlorierter Thermoplaste im Input-Material der Anlage Ebenhausen war sehr häufig um das zweieinhalbfache höher als der durchschnittliche Anteil in Kunststoffabfällen aus Haushalten. Da Müllverbrennungsanlagen und Kunststoffaufbereitungsanlagen PVC-haltige Chargen an die Pyrolyse-Anlage weiterleiteten, hatte das Material häufig statt des durchschnittlichen PVC-Anteils von rund 10 % einen PVC-Anteil von 25 % und mehr. Der stark erhöhte Chloranteil führte durch chemische Reaktionen mit dem Sand des Sandbetts in der Anlage bei Betriebstemperaturen über 700 °C zur Bildung von Calciumchlorid, das durch Anbackungen zu verfahrenstechnischen Problemen führte. Bei geringem Chloranteil traten diese Probleme nicht auf.

Diese Gründe sprechen nicht gegen die Verfahrenstechnik der Pyrolyse, sondern sind in der Kostenstruktur der Entsorgung bzw. in der Zusammensetzung der vermischten Kunststoffabfälle zu suchen. Durch entsprechende Maßnahmen lassen sich diese Probleme im Prinzip lösen: Entsorgungsgebühren bei der Verwertung mittels Pyrolyse in Höhe von ca. 200,- je Mg Kunststoffabfälle. Konsequente Minimierung bzw. Eliminierung chlorierter Fraktionen. (Die mehrfach beschriebenen Probleme um das PVC werden Substitute favorisieren und diesen Kunststoff langfristig vom Markt drängen). Die Sammlung großer Mengen an sortenreinen Kunststoffabfällen im Rahmen

des Dualen Systems wird deren Verwertung mittels Pyrolyse wieder interessant machen.

Gegenüber den anderen chemischen Recycling-Verfahren hat die Pyrolyse den Vorteil, technisch ausgereift und langjährig sowohl im Technikums- als auch im industriellen Maßstab erprobt zu sein. Die anderen Verfahren stehen hingegen erst am Anfang der Forschung und Entwicklung. Die Weiterentwicklung zum industriellen Maßstab wird erfahrungsgemäß einen Zeitraum von zehn Jahren und mehr in Anspruch nehmen.

10. Literaturverzeichnis

- [1] AKW: Diverse Firmenunterlagen
- [2] Amtsblatt für Berlin 40. Jg. Nr. 40, 09.08.1990, S. 1379 ff
- [3] Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (Hrsg.): PVC-Recycling in der Praxis, Schriftenreihe Band 2, Bonn 1990
- [4] Bahr, A.; Vogt, V.; Djawadi, H.: Sortierung von Kunststoffabfällen, Teilbericht 4 des Forschungsprogrammes, Wiederverwertung von Kunststoffen, TU Clausthal, Clausthal 1980
- [5] Barghoorn, M. et.al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1979/80, Bericht Nr. 10303503 im Auftrag des UBA, Berlin 1981
- [6] Barghoorn, M. et.al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 – 85, Bericht Nr. 10303508 im Auftrag des UBA, Berlin 1986
- [7] Barghoorn, M.: Persönliche Mitteilung
- [8] Barniske, L.: Stand der thermischen Abfallbehandlung in der Bundesrepublik Deutschland, in: VDI Berichte 637, Thermische Abfallbehandlung in Entsorgungskonzepten, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987
- [9] Baubehörde Hamburg: Zwischenbericht des Pilotprojektes „Getrennte Kunststoffsammlung“ in Bergedorf, Hamburg 1986 (unveröffentlicht)
- [10] Bauer, G.: Chemische Verfahren zur Wiederverwertung von hochwertigen Kunststoffen, (Manuskript unveröffentlicht)
- [11] Bauer, G.: Recycling von Polyurethanabfällen und gemischte Polymerabfällen durch Alkoholyse, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling von Abfällen I, EF Verlag, Berlin 1989, S. 293-302
- [12] Bauer, W.: Dem Prinzip des Recycling wird nicht entsprochen, in: Handelsblatt Nr. 62 vom 28.03.1990
- [13] Baumann, H.; Hinterhofer, O.: Entsorgung und Recycling von Kunststoff-Abfällen, in: Phoenix International 4/86, S. 10 ff
- [14] Baurenschmidt, K.: Real-Kunststoffaufbereitungssystem für gemischte Kunststoffe, Vortrag im VDI Bildungswerk
- [15] Berg, W. van: Abfallproblem mit abbaubaren Kunststoffprodukten entschärfen, in: Handelsblatt vom 2.12.1990
- [16] Biendarra, G.: Untersuchung über das Emissionsverhalten der Leichtmüllfraktion aus Auto shredderanlagen beim Verbrennen, FAT - Schriftenreihe Nr. 72, Frankfurt/Main 1988
- [17] Bilitewski, B.: Recyclinganlagen für Haus- und Gewerbeabfälle, Beiheft 21 zu Müll und Abfall, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1985
- [18] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft – Eine Einführung, Springer Verlag, Berlin 1990
- [19] Bilitewski, B.; Schenk, B.: Mögliche Lösungswege zur Abfallvermeidung und zum Recycling von Verbundwerkstoffen mit Papier/Karton als Trägermaterial, Studie März 1991 (unveröffentlicht)
- [20] Bockhorn, H.; Burckschat, M.: Recycling von Kunststoffabfällen durch partielle Oxidation, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987, S.209 ff
- [21] Bonau, H.; Tiemann, V.: Schnellcharakterisierung von Thermoplastrecyclaten mit dem Mikroskop, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag Berlin 1987
- [22] Brahms, E.; Eder G.; Greiner, B.: Papier-Kunststoff-Verpackungen-Mengen und Schadstoffbetrachtung – BMFT – Forschungsbericht 143 03 68, 1988
- [23] Brenner, W.; Baumberger, H.: Abluftbehandlung beim thermischen Kunststoffrecycling, in: Phoenix International 6/87, S. 28-32
- [24] BUA-Stoffbericht 4, 1986: Di-2-ethylhexylphthalat, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1986
- [25] Büchner, J.; Geipel, W.; Hultsch, R.: Analyse des Energie- und Stoffeinsatzes zum Verpacken flüssiger Nahrungs- und Genußmittel, Band 4, Analyse von Rückgewinnungsmöglichkeiten von Verpackungsabfällen, Forschungsbericht T 81-0602, BMFT, München 1981
- [26] Bühl, R.: Wiederverwertung von PVC-Abfällen, Aussichten für ein materielles Recycling, Tagungsbericht Technische Akademie Esslingen, März 1990
- [27] Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.(BDE): „Duales System in der Praxis – Umsetzen der Verpackungsverordnung“, Info-Sonderausgabe, Düsseldorf 1991
- [28] Burg, C.; Brenzinger, R.: Kunststoffe im Automobilbau – eine Herausforderung für das Recycling, in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Recycling International, Berlin 1984, S. 554-558
- [29] Dahlern, I. von: Neuer Kunststoff aus PUR-Abfällen, in: Der Tagesspiegel vom 20.02.88
- [30] Dennozon, M.: Plastics, A Reusable Resource Studie Shell International Petroleum Company, Ltd., GB 1991
- [31] Deutscher Industrie- und Handelstag (DIHT): Statistik der Abfallbörse 1986, Mitteilung an die Industrie- und Handelskammern, 1987
- [32] Drink, H.M.; Rühmann, H.: Erfassung von Kunststoffabfällen, Teilbericht 1 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, RWTH Aachen, Aachen 1977

- [33] Dr. Bischoff SA: Vergleichende Umweltbilanz der Mehrwegsysteme von Coca-Cola, 1,5 l MW PET-Flasche/1 l MW Glasflasche, Studie im Auftrag der Fa. Coca-Cola, 1989
- [34] eco facts, Gesamteuropäische Nachrichten und Trends für Umweltrecht und Politik, Frankfurt/a.M. 1/90, S.6
- [35] Eder, G.: Aufkommen und Schadstoffbelastung von Kunststoffabfällen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.) Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987
- [36] Entec: Firmenunterlagen
- [37] Ferber, M.: Neues Verfahren für ein Kunststoffrecycling, in: Müll & Abfall 1/88, S. 28 f
- [38] Franke, M.: Großversuch soll Verwertbarkeit von Weichspülerflaschen klären, in: Umwelttechnik Berlin, Nr. 7/Feb. 88
- [39] Franke, M.: Kunststoffverpackungen im Recycling-Test, in: Umwelt 3/88, S. 66 ff.
- [40] Franzkoch, B. et. al.: Verwertung von Kunststoffabfällen über die Schmelze, Teilprojekt 7 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, RWTH Aachen, Aachen 1979
- [41] Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. (GKV): Jahresbericht 1985/86, 1988/89, 1990/91
- [42] Geyer, V.; Graeber, W.D.: Anwendung der Tieftemperatur-Technik beim Recycling von Verbundstoffen aus der Verpackungsindustrie, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Verpackung und Umwelt, EF Verlag, Berlin 1982, S. 469 ff
- [43] GIAB: Duroplast Recycling, System GIAB (Firmeninformation)
- [44] GIAB Informationsbeschreibung Pkw-Trabant-Entsorgung unter Berücksichtigung seiner besonderen Duroplast-Karosserie (Firmeninformation)
- [45] Goepfert; Reimer: Sammlung von Kunststoffabfällen, Bericht für das Programm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Teilprojekt 2, Verband Kunststofferzeugende Industrie (Hrsg.), 1978
- [46] Group Rhône-Poulenc: Firmeninformation
- [47] Herbold GmbH: Firmenunterlagen, Meckesheim
- [48] Herrler, J.: Ist ein umweltverträgliches Recycling von Kunststoffabfällen aus Haushaltsabfällen möglich?, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987, S. 231 ff.
- [49] Herrler, J.: Stand der Entwicklung von Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle aus Müll unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, Öko-Institut, Freiburg 1985
- [50] Herrler, J.; Knorn, Ch.: Abfallverwertung in Bayern. Teil I: Stand der stofflichen und biologischen Verwertung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Abfällen in Bayern, in: Müll & Abfall, 6/90, S.353-364
- [51] Hospe, J.: Joghurtbecher werden recycelt, in: UmweltMagazin Mai 1990, S. 18-19
- [52] ICI: BIOPOL – natürliche Thermoplaste, (Firmeninformation)
- [53] Industrieverband Verpackung und Folien aus Kunststoff (Hrsg.): Positionspapier zu abbaubarem Kunststoff, 1990
- [54] INTECUS: Einfluß der Altpapier-Entnahme auf die Entsorgungskosten von Hausmüll in der Bundesrepublik Deutschland, Studie im Auftrag papierverarbeitender Betriebe, April 1989
- [55] INTECUS: Untersuchung von Kunststoffabfällen; Abfallvermeidung – parallel zur optimalen Wertstoffverwertung bei der getrennten Sammlung – ; unveröffentlichte Studien im Auftrag der Baubehörde Hamburg 1987/88
- [56] Jorden, W.: Konstruieren recyclinggerechter Produkte, Kunststoffanwendungen in der neuen VDI Richtlinie 2243, Vortrag anläßlich des Kunststoff-Recycling-Tag '91, Berlin 21./22.03.1991
- [57] Kaminsky, W.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen und Altreifen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Pyrolyse von Abfällen, EF Verlag, Berlin 1985, S. 166-194
- [58] Kaminsky, W.; Sinn, H.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen Teilprojekt des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Hamburg 1981
- [59] Kaminsky, W. et. al.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen in der Wirbelschicht, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling International, EF Verlag, Berlin 1984, S. 664 – 668
- [60] Kaminsky, W.: Wertstoffrückgewinnung durch Pyrolyse von Kunststoffen in der Wirbelschicht, in: EntsorgungsPraxis Spezial Nr. 1, S. 17-21
- [61] Kanuit, P.: Wirtschaftliche Kunststoffrückgewinnung aus kommunalen und industriellen Abfällen, in: VKS (Hrsg.): Ausstellerforum Abfall, Kommunschriften-Verlag, München 1987
- [62] Käufer, H.: Aktives Recycling von Kunststoffen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987
- [63] Käufer, H.; Karras, W.: Aufbereitung und Verwertung von sortenreinen Kunststoffen aus Kunststoffverpackungen, Diskussionsgrundlage zur Bewertung der Ergebnisse und zur Festlegung von Folgerungen, Kunststofftechnik TU Berlin, März 1991
- [64] Käufer, H. et.al.: Aufbereitung und Verarbeitung von sortenreinen Kunststoffen aus Kunststoffverpackungen, Kunststofftechnik, TU Berlin, März 1991
- [65] Käufer, H.: Recyclinggerechtes Konstruieren, in: Kunststoffe 79 (1989) 4, S. 339-343
- [66] Käufer, H. et.al.: Möglichkeiten und Bewertungskriterien für Heraustrennen und Recycling von Kunststoffen aus komplexen Altprodukten, in: Müllverbrennung und Reststoffgewinnung (1990), S. 68
- [67] Knisch, H.: Müll von Anfang an, in: Müllmagazin 1/91, S. 10-12
- [68] Kollmann, H. et.al.: Stoffströme und Emissionen durch Produktionen, Verwendung und Entsorgung von PVC, KFA Forschungszentrum Jülich GmbH, 1990

- [70] Korff, J.; Keim, K.-H.: Hydrierung von synthetisch organischen Abfällen, in Erdöl, Erdgas, Kohle, Heft 5, Mai 1989, S. 223-226
- [71] Kreibich, R.: Entsorgungsfreundliche Gestaltung komplexer Produkte, in: Müll & Abfall (7) 1989, S. 371
- [72] Kunststoff Information: diverse Meldungen, Jahrgänge 1988 – 1991, Bad Homburg
- [73] Kunststoff-Recycling-Zentrum-Verband, Berlin: Verbandsunterlagen, 1991
- [74] Leschonski, K.; Goritzke, W.; Röthele, S.: Aufbereitung von Kunststoffabfällen zum Zwecke der Wiederverwertung (Zerkleinern, Klassieren), Forschungsprogramm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, April 1981
- [75] Loch, J.: Wiederverwertung von industriellen Kunststoffen, Forum Städtehygiene Nr. 41, Nov./Dez. 1990, S. 320-322,
- [76] Löffler, W.: UK-Wesseling-Verfahren zur Umwandlung von Kunststoff zu Öl, in: Reimann, D. (Hrsg.): Stoffliche Verwertung von Abfall- und Reststoffen, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 26, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1989, S. 121-143
- [77] Lützwow, W; Pastuska, G.: Materialprüfung zur Beurteilung mehrmals wiederverarbeiteter Thermoplaste, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987, S. 58-67
- [78] Mast, M: Teure Entsorgung vermeiden, in: Müllmagazin 1/1991, S.18-20
- [79] Menges, G., et.al.: Recycling des Kunststoffanteils von PKWs; ja aber wie?, in: Kunststoffe 78 (1988), 7, S. 573-583
- [80] Molkerei Alois Müller: Presseinformation März 1990
- [81] Müller, H.; Haberstroh, E.: Verwendung von Kunststoffen im Automobilbau und Wiederverwertungsmöglichkeiten, FAT-Schriftenreihe Nr. 52, Frankfurt, Main 1986
- [82] Niederdelmann, G. et.al.: Hydrolyse von Kunststoffabfällen, Teilprojekt 6 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, 1979
- [83] Nöldechen, A.: Husarenstreich mit Preisvorteil, in: highTech 2/91, S.32
- [84] Novamont (Hrsg.): Un nouveau material biodegradable Mater Bi, Firmeninformation der Fa. Novamont
- [85] N.N.: Sinnvolle Wiederverwertung, in: Sekundär-Rohstoffe, 1/1991, S. 13-15
- [86] N.N.: Begründung zum Entwurf der Verpackungsverordnung des BMU, in: Abfallwirtschaftsjournal Nr. 3, 1991, S. 97
- [87] N.N.: Hat Kunststoffrecycling zukünftig mehr Chancen?, in: Umwelttechnik Berlin (UTB) Nr. 25/1991, S. 5
- [88] N.N.: Beseitigung von Kunststoffabfällen, in: VDI Nachrichten Nr. 46, 17.11. 1989
- [89] N.N.: Kennzeichnung und Wiederverwertung von Kunststoffverpackungen, in: Abfallwirtschaftsjournal 2(1990) Nr. 3, S. 159 f
- [90] N.N.: Zeichennutzung für den Grünen Punkt, in: UmweltMagazin 2/1991, S. 7
- [91] N.N.: Kartons in Grundbausteine zerlegt, in: UmweltMagazin, April 1991
- [97] N.N.: PET-Flaschenrecycling in den Niederlanden, in: Re Nr. 07, 08.04.1991
- [98] N.N.: PET-Getränkeflaschen-Recycling in der Schweiz, in: Umweltbrief 3/1991
- [99] N.N.: Lösung für eine Branche, in: Entsorga-Magazin 3/1991, S. 30-31
- [100] N.N.: Bundespost läßt Regranulate für Schutzrohre zu, in: Entsorga-Magazin 11/1990, S. 6
- [101] N.N.: Abbaubare Kunststoffe, begrenzter Einsatz, in Entsorga-Magazin 10/90, S. 61
- [102] N.N.: Biologisch abbaubarer Kunststoff, in: Umwelt Bd. 20 (1990) Nr. 7/8, S. 368
- [103] N.N.: „Bio“-Kunststoff, in: Sekundärrohstoffe März 1991, S. 56-57
- [104] N.N.: Biologisch abbaubarer Kunststoff Biopol – Plastik vom Rübenacker, in: Unternehmen & Umwelt Nr. 3, 11/1988, S. 2-6
- [105] N.N.: Wirtschaftliches Feinmahlen von Kunststoffen, in: Chemie-Technik Nr. 8, 1989, S. 28 – 30
- [106] N.N.: Neues Recycling Verfahren für Polyurethan-Abfälle, in: Automobiltechnische Zeitschrift 91 (1989), S. 168
- [107] N.N.: Blumenkübel aus Scheckkarten, in: UmweltMagazin 4/1991, S. 8
- [108] ÖKR Kunststoff-Recycling Holdinggesellschaft mbH: Präsentation, Wien Februar 1991
- [109] Oppermann, M.: Entwicklung eines Recyclingverfahrens zur direkten Wiederverwertung von Duroplastabfällen, BMFT – Forschungsbericht T 83-302, 1983
- [110] Pautz, D.: Verwertung von Shreddermüll, in: UmweltMagazin 10/83, S. 20 – 21
- [111] Peters, H.: Die Wand des Behälters besteht aus sechs Schichten verschiedener Werkstoffe, in: Handelsblatt vom 29.04.87
- [112] Pfeiffer, M.: Mehr als nur ein Werbegag, in: VDI-Nachrichten Nr. 10, 08.03.1991, S. 12
- [113] Plasta Erkner Kunstharz- und Preßmassefabrik GmbH: Plastaresin 210 (Merkblatt)
- [114] Raber, E.: Zur Trabant-Entsorgung, in: UTB Nr. 24, S. 13
- [115] Raber, E.: Automobil-Recycling: Zukunftsproblem und Zukunftschance, Vortrag anlässlich einer Audi-Informationsveranstaltung, Deutsche Automobilgesellschaft mbH, Braunschweig 24.10.1990
- [116] Rauser, G.; Löffler, W.: Verfahren zur hydrierenden Verflüssigung von Kunststoffabfällen, Vortrag auf dem Leobener Kunststoffkolloquium „Kunststoffe in Entsorgung und Deponie“ vom 10.5.1990
- [117] RE Nr. 07 vom 08.04.1991, S. 9
- [118] REAL Firmenunterlagen
- [119] Recycloplast AG: Firmenunterlagen
- [120] REFAKT: Firmenunterlagen
- [121] Reichelt, W. (Fa. IFA): persönliche Mitteilung

- [122] Revive System: Firmenunterlagen
- [123] RGR: Firmenunterlagen
- [124] Ropertz, G.: Wirtschaftliche Kunststoffrückgewinnung aus kommunalen und industriellen Abfällen, in: Aufbereitungs-Technik 9/86, S. 489-494
- [125] Rüter, M.: Verwertungsverfahren für Kunststoffabfälle am Beispiel des Shreddermülls von Altautos, für: Öko-Institut e.V. Darmstadt, 1989
- [126] Scheffold, K.: Getrennte Sammlung und Kompostierung, EF Verlag, Berlin 1985
- [127] Scheffold, K.: Erfahrungen mit der Getrenntsammlung von Hausmüll, in: Entsorgungspraxis 4/90, S. 134 ff
- [128] Schertz, W.: Die Möglichkeiten der Sammlung und des Recycling beim Einweg-Verbundkarton, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Franke, M.: Verpackung und Umwelt, EF Verlag, Berlin 1987, S. 359 – 370
- [129] Schönborn, H.: Verwertbarkeit von Kunststoffen; in: Konzepte zur Gewinnung von Wertstoffen aus Hausmüll, 9. Mülltechnisches Seminar TU München 1986
- [130] Schwarz, O. et al.: Kunststoffverarbeitung, 3. Aufl., Vogel-Buchverlag, Würzburg 1985
- [131] Schlegel, M.; Bollmann, W.; Kunze, B.: Die Nachfrage nach Altpapier ist größer als das Aufkommen, in: Papier + Kunststoff – Verarbeiter, 10/1988, S. 26ff
- [132] Scheikl, R.: Verwertung von Kunststoffmüll, in: EntsorgungsPraxis 9/1990, S. 491 – 493
- [133] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Öffentliche Abfallbeseitigung, Fachserie 19, Reihe 1.1, Metzler-Poeschel, Stuttgart 1987
- [134] Starke, L.: Stand und Probleme der Verwertung von Kunststoffabfällen aus Haushalten, Vortrag anlässlich der 5. Duisburger Recycling Tage, 20./21.02.1991
- [136] Starke, L.: PVC-Recycling in den ostdeutschen Ländern der Bundesrepublik Deutschland, Schriftreihe PVC und Umwelt, Band 4, Bonn 1990
- [137] Stricker, U.: Perspektiven des Kunststoffrecyclings, Interdisziplinäre Forschungsgemeinschaft (InFo)-Kunststoff e.V., Berlin 1990
- [138] Tack, J.: Recycling von Kunststoffen aus Haushaltsabfall – ein Materialkreislauf, in: EntsorgungsPraxis Spezial Nr. 1 (1991), S. 22-25
- [139] Tetra-Pak GmbH, A: Firmeninformationen
- [140] TGL 9704 der DDR vom März 1979
- [141] Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Pyrolyse von Abfällen, EF Verlag, Berlin 1985
- [142] Tötsch, W. et al.: Polyvinylchlorid – zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes, Fraunhofer-Gesellschaft, Karlsruhe 1990
- [143] trz: Biokunststoffe aus Kohlendioxid, in: highTech, März 1991, S. 16
- [144] Umweltbundesamt (Hrsg.): Daten zur Umwelt 1986/87, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1986
- [145] Umweltbundesamt (Hrsg.): Kunststoffabfälle, Materialien zum Abfallwirtschaftsprogramm der Bundesregierung 2/76, Berlin 1979
- [146] Umweltbundesamt Österreich (Hrsg.): Studie über Umweltprobleme durch PVC, UBA Reports 89 – 031, Wien April 1989
- [147] Verband der Automobilindustrie e.V. u.a.: Konzept zur zukünftigen Altautoverwertung, Oktober 1990
- [148] Verband der Kunststoffherstellenden Industrie (VKE): Diverse Informationsblätter
- [149] Volkert, U.: Einsatz von Recycling-Kunststoff – Möglichkeiten und Grenzen, Vortrag anlässlich der 5. Duisburger Recycling-Tage, 20.-21.2.1991
- [150] Warnke, R.: Thermolyse von kunststoffhaltigen Problemabfällen am Beispiel von Shredderleichtmüll, Vortrag anlässlich der 5. Duisburger-Recycling-Tage, 20./21.02.1991
- [151] Werth, P.: Produktinnovationen in der Sekundärrohstoffwirtschaft am Beispiel von Berlin (West), Ergebnisbericht der Vorphase, Alba GmbH & Co KG, Berlin 1987
- [152] Wille, G.: Verpackungsabfall in der ehemaligen DDR – Stand und Erfordernisse, in: Schenkel, W.; Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Konzepte in der Abfallwirtschaft 3, EF Verlag, Berlin 1990, S. 101-106
- [153] Wollny, V. Chancen nicht genutzt, in: Müllmagazin 1/1991, S. 7 – 9
- [154] Wormser Kunststoffrecycling: Firmenunterlagen
- [155] Wutz, M.: Lösungswege zum Kunststoffrecycling von Altautos, Vortrag anlässlich der VDI-K-Jahrestagung, Mannheim 1990
- [156] Zipperling: Absage an abbaubare Polymere, in Kunststoff Information Nr. 965, Bad Homburg 18.01.90, S. 1+7

Müll und Abfall

Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen

Organ für die gesamte Entsorgung und Abfallwirtschaft

Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) – Mitteilungen des Arbeitskreises für die Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen e. V. (ANS)

Schriftleitung: Dipl.-Ing. M. Ferber

Erscheinungsweise: Die Fachzeitschrift erscheint monatlich mit etwa 50 Seiten, DIN A 4, je Heft im Abonnement DM 15,60, Einzelheft DM 18,-. Abonnementspreis für Bezieher in Ausbildung (gegen Vorlage einer Studienbescheinigung) DM 11,80.

Ökonomische und ökologische Fragen haben in der Abfallwirtschaft ein ungleich größeres Gewicht erlangt. Die Diskussion beginnt bei der Frage der Abfallvermeidung und geht bis zu den möglichen Langzeitauswirkungen von Beseitigungsmethoden. Alle diese Überlegungen sind wichtig und notwendig. Über sie darf aber nie vergessen werden, daß der verantwortliche Praktiker trotzdem nach wie vor die Aufgabe hat, die heute entstehenden Abfälle einzusammeln und sie Tag für Tag so gut und so wirtschaftlich wie möglich zu beseitigen.

MÜLL und ABFALL ist sich dieser Problematik bewußt und daher stets bemüht, beiden Seiten, der Grundsatzdiskussion ebenso wie der unentbehrlichen täglichen Praxis, Raum zu geben.

Eine Fachzeitschrift von Fachleuten für Fachleute ist angesichts der anstehenden Fragen und Probleme in der Abfallwirtschaft mehr denn je von Interesse:

MÜLL und ABFALL steht seit 24 Jahren für diesen Bereich und bietet den umfassenden Erfahrungsaustausch zwischen allen in der Praxis an der Entsorgung und Abfallwirtschaft beteiligten Kreisen.

Die Mitarbeit von Experten aus Forschung, Industrie, Verwaltung und Organisationen, wie aus der kommunalen und privatwirtschaftlichen Praxis vor Ort, gibt die Gewähr für die ausgewogene und fundierte Berichterstattung und das hohe Niveau der aktuellen Beiträge.

Schwerpunkte der redaktionellen Berichterstattung in MÜLL und ABFALL:

- Menge und Zusammensetzung der Abfallstoffe
- Hygiene, Biologie und Chemie
- Vermeidung von Abfällen
- Wiederverwertung durch getrennte Sammlung oder Sortierung, Schadstoffsammlung
- Sammlung, Umschlag und Transport
- Kompostierung
- Thermische Verwertung durch Verbrennung und Pyrolyse
- Energie aus Abfall, Schlackeverwertung, Schrott
- Behandlung und Beseitigung von Schlämmen
- Ablagerung, Sickerwasser, Deponiegas
- Sonderabfälle, Gewerbeabfälle und Industrieabfälle
- Bauschuttaufbereitung
- Krankenhausabfälle
- Altlastensanierung
- Straßenreinigung und Winterdienst
- Planung und Organisation
- Rechtsfragen, Normen, Merkblätter
- Tagungen, Seminare, Ausstellungen, Industrienachrichten
- Thema Abfall im Bundestag und in den Landtagen

MÜLL und ABFALL erscheint 1992 bereits im 24. Jahrgang. Als von Interessengruppen unabhängige und kritische, gleichwohl verantwortungsbewußte Fachzeitschrift ist sie die unentbehrliche Informations- und Arbeitsgrundlage für alle in diesem Bereich tätigen Ingenieure und Kaufleute, Wissenschaftler und Praktiker, Juristen und Verwaltungsfachleute – sei es in den Kommunen, Fuhrparks und Stadtreinigungsbetrieben, in den Beseitigungsunternehmen, in Industrie und Forschung, den Verbänden oder in der Politik.

Die gesammelten Zeitschriften bieten Ihnen ein fundiertes Wissen, welches durch das ausführliche Jahresinhaltsverzeichnis zuverlässig erschlossen wird. Einbanddecken geben den gesammelten Jahrgängen ein einheitliches Aussehen: es steht Ihnen damit ein hervorragendes Nachschlagewerk zur Verfügung.

Zurückliegende Jahrgänge sind in gebundener Form erhältlich. Bitte fordern Sie Informationen hierüber an!



Erich Schmidt Verlag
Berlin · Bielefeld · München

MÜLL HAND BUCH

KURZÜBERSICHT

Band 1

Verzeichnisse, Übersichten, Einführung
Allgemeines
Abfallwirtschaft und Umweltpolitik
Recht und Verwaltung
Raumordnung, Landes-/Bauleitplanung
Abfallwirtschaft im Ausland

Band 2

Arten der Abfälle
Begriffsbestimmungen
Menge und Beschaffenheit flüssiger
Abfälle
Menge und Zusammensetzung fester
Abfälle
Untersuchungsrichtlinien der LAGA
Sammlung und Transport flüssiger
Abfälle und Schlämme
Sammlung und Abfuhr fester Abfälle
Verwertung von Hausmüll durch
getrennte Sammlung und/oder
Sortierung
Behandlung und Beseitigung
von Abfallschlämmen

Band 3

Beseitigung ölhaltiger Abfälle
Beseitigung von Abfällen durch
Ablagerung
Hygiene der Siedlungsabfall-
wirtschaft
Biologie der Rotteprozesse
bei Kompostierung
Behandlung und Beseitigung fester
Abfälle durch biologische
Verfahren

Verwertung von Abfällen im Landbau

Band 4

Beseitigung von Abfällen durch
Verbrennung
Neue thermische Verfahren
Sammlung, Behandlung, Verwertung
und Ablagerung von Gewerbeabfällen

Band 5

Sonderabfälle

Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen

Ergänzbare Handbuch für die kommunale und industrielle Abfallwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Dr. med. habil. G. Hösel, Ministerialdirigent a. D., Dipl.-Ing. W. Schenkel, Erster Direktor und Professor beim Umweltbundesamt, und Dr.-Ing. H. Schnurer, Ministerialdirigent beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Begründet von Prof. Dr.-Ing. E. h. W. Kumpf†, D. K. Mass† und Prof. Dr.-Ing. H. Straub†

Unter Mitwirkung in- und ausländischer Fachleute aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft.

Ergänzbare Ausgabe, rd. 8700 Seiten, DIN A 5, einschließlich 6 Spezialordner DM 468,-, Ergänzungen von Fall zu Fall. Seitenpreis ca. DM 0,36.

Von der Müllbeseitigung zur Abfallwirtschaft – damit ist die Entwicklung der letzten zwei Jahrzehnte umrissen. Die Prioritäten haben sich geändert:

- **Abfallvermeidung geht heute vor**
- **Abfallverwertung; diese wiederum geht vor**
- **Abfallbeseitigung.**

Beseitigt werden sollen nur Abfälle, die sich nach Stand der Technik weder vermeiden noch verwerten lassen. Dies stellt neue Anforderungen an alle Beteiligten, vom Produktionsbetrieb bis zum professionellen Beseitiger: Mehr und mehr verschiebt sich die Zusammensetzung des zu beseitigenden Abfalls hin zu Sonderabfällen, die teilweise komplizierte Vorbehandlungen erfordern.



Sich dieser Herausforderung erfolgreich zu stellen, erfordert ein Arbeitsmittel, das in über 25 Jahren seine Eignung unter Beweis gestellt hat und heute aktueller und wichtiger als je zuvor ist:

Das MÜLL-HANDBUCH



Erich Schmidt Verlag
Berlin · Bielefeld · München