

Beihefte zu

Müll und Abfall

Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen



27

Recycling von Kunststoffabfällen

Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit

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

Kunststoff- Aufbereitung aus Müll

Die Maschinenfabrik Andritz AG plant, baut und liefert Anlagen zur Herstellung von Regranulat aus kommunalen und industriellen Abfällen. Wirtschaftlichkeit und Schonung der Umwelt sind die wesentlichen Kriterien der Andritz-Technologie. Aus dem Regranulat der großtechnischen Anlage in Wien werden Folien, Behältnisse, Müllcontainer, Rohre etc. hergestellt.



Produkte aus Regranulat

Maschinenfabrik Andritz
Aktiengesellschaft
Graz-Andritz, Austria

A-8045 Graz-Andritz
Statteggerstraße 18
Postfach 24

Telefon: (0316) 6902-0
Telefax: (0316) 6902-1313
Telefax: (0316) 6902-2503



ANDRITZ

ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

Pfähle, Pfosten, Latten, Palisadenprofile



Aus Vollkunststoff für die Bereiche:

- Land-, Bau- und Wasserwirtschaft
- Hobby und Garten
- Gartenbau und Baumschulen

Ein Recycling-Produkt aus dem Hause



Städtereinigung Nord

GmbH & Co KG

Eckernförder Landstraße 300 · 2390 Flensburg · Telefon (0461) 97014

wartungsfrei
witterungsbeständig
preiswert

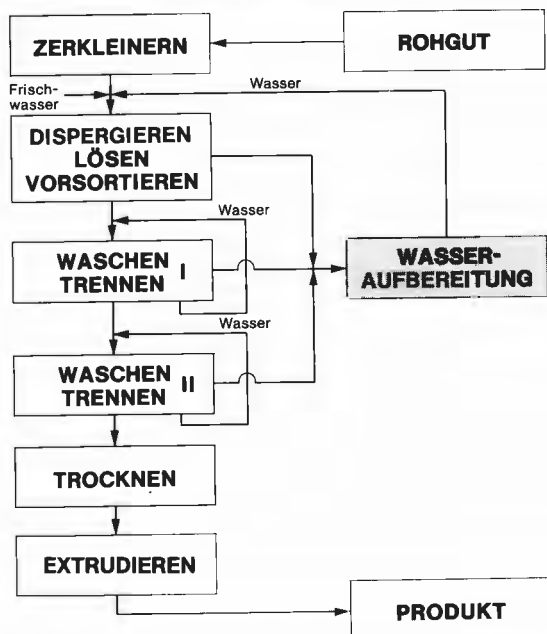
ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

ReKu-PROFIL

Recycling von Kunststoffen



Aufbereitungsverfahren für Kunststoffabfälle unterschied- licher Herkunft

- z.B. — verschmutzte Folien,
Verpackungen etc.
— Granulatmischungen
— PP aus AKKU-Schrott
— PE aus Kabelschrott
— PET aus Flaschen und
Filmmaterial

- wirtschaftlich und technisch
gelöst
- komplett angeboten von einem
kompetenten Partner

**Beratung + Planung +
Realisierung aus einer Hand**

**AKW Apparate
+ Verfahren GmbH**



Wir sind vertreten in:

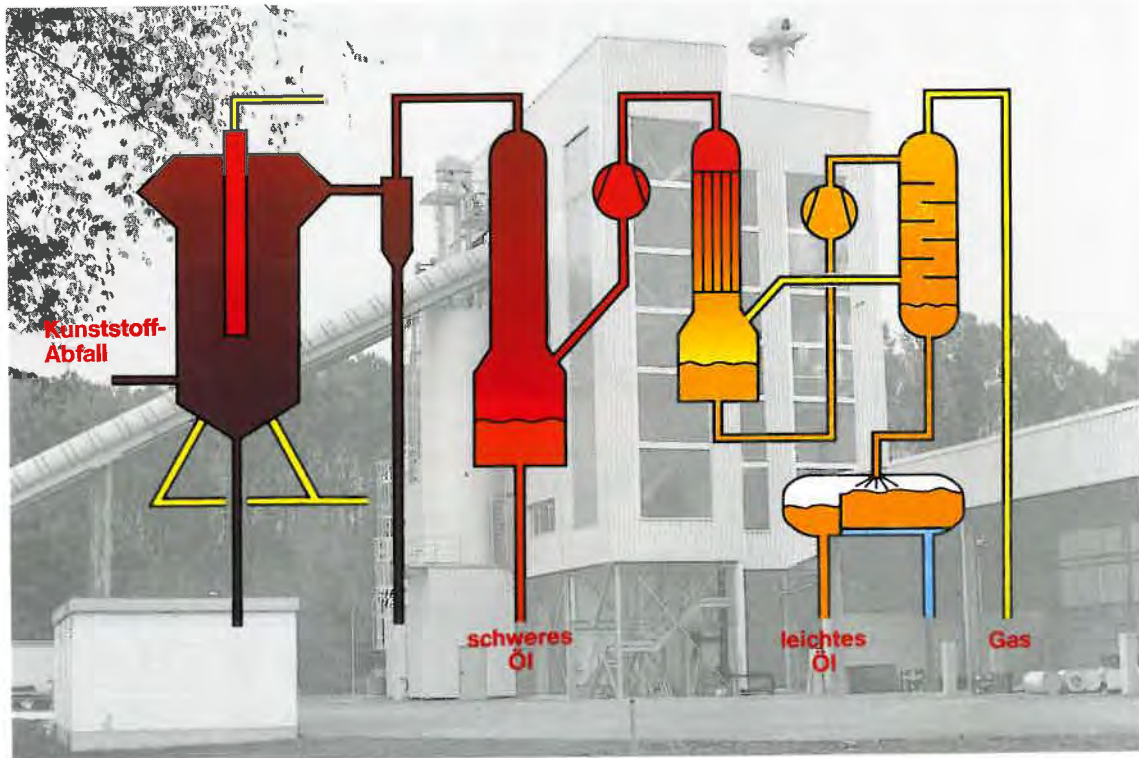
Bayern
Ing.-Büro
Heinrich Bretz
Budapester Str. 18
8000 München 80
Tel. (089) 682068

Hessen
Ing. Büro Jacob
Nachtigallenstr. 60
Postfach 2133
6078 Neu Isenburg 2
Tel. (06102) 53940

**Nordrhein-
Westfalen**
Dipl.-Ing. Dieter Poggendorf
Waldweg 64
4400 Münster
Tel. (0251) 717692

Georg-Schiffer-Str. 70 · Postfach 1169
D-8452 Hirschau/Opf. · West Germany
Tel. 09622/18330 · Telex 17962282
Teletex 962282 · Telefax 09622/18376

Asea Brown Boveri Kunststoff-Pyrolyse:



Machen Sie etwas aus Ihrem Abfall.

Jährlich fallen im Bundesgebiet schon heute mehr als 2 Mio t Kunststoff-Abfälle an – ein besonders lästiger Müll oder ein wertvoller Rohstoff, je nachdem was man daraus macht!

ABB hat die Technik für ein echtes Recycling des Kunststoff-Mülls: In Ebenhausen bei Ingolstadt befindet sich seit Februar die erste Kunststoff-Pyrolyse im Warmprobetrieb.

Unsere Technik in Stichworten: Kunststoff-Abfälle werden in einem gasbeheizten Wirbelschicht-Reaktor unter Sauerstoff-Abschluß thermisch aufgespalten: Es entsteht ein Pyrolysegas, das wertvolle Grundstoffe der Kunststoff-Chemie, wie die BTX-Aromaten, enthält. Nach der fraktionierten Kondensation gewinnen Sie beispielsweise aus Hausmüll-Kunststoffen rund 35% Öl und 43% Gas. Wertvolle Einsatzstoffe für neue chemische Produkte und für die energetische Nutzung – unter anderem für die Beheizung des Pyrolyse-Reaktors.

Mit der ABB-Kunststoff-Pyrolyse ist Ihr Abfall Wirtschaftsgut

BBC Brown Boveri AG
Abt. KW/IP, Postfach 100351, 6800 Mannheim 1

ABB
ASEA BROWN BOVERI

Recycling von Kunststoffabfällen

Grundlagen – Technik – Wirtschaftlichkeit

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

ERICH SCHMIDT VERLAG

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Recycling von Kunststoffabfällen: Grundlagen -Technik -
Wirtschaftlichkeit/von Georg Härdtle ... - Berlin: Erich
Schmidt, 1988

(Beihefte zu Müll und Abfall; H. 27)

ISBN 3-503-02715-7

NE: Härdtle, Georg (Mitverf.); Müll und Abfall/ Beihefte

Bild auf dem Umschlag:

links: Kunststoffabfälle aus Hausmüll

rechts: Begrenzungspfähle aus Kunststoffabfällen

ISBN 3 503 02715 7

Alle Rechte vorbehalten

© Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin 1988

Druck: Regensburg, Münster

Vorwort

Das Recycling von Kunststoffabfällen ist im Vergleich zum Recycling von Glas, Textilien, Papier und Metallen eine neuere Herausforderung. Unter dem Sammelbegriff Kunststoff werden 7 Mio Mg/a Werkstoffe produziert. Von den 4 Mio Mg/a in der Bundesrepublik Deutschland verkauften Kunststoffen fallen 2 Mio Mg/a als Abfälle an, von denen nur wenige gemeinsam verarbeitet werden können. Hochwertige Recyclingprodukte können nur aus sortenreinen Kunststoffabfällen hergestellt werden, aber viele Kunststoffabfälle fallen gemischt und verschmutzt an.

Soll Kunststoff zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen in den Produktionskreislauf rückgeführt werden, muß der Abfall getrennt erfaßt oder vor dem eigentlichen Recyclingprozeß sortiert werden. Unterschiedliche Kunststoffe müssen getrennt, Fremtteile, Staub und Schmutz ausgeschieden werden.

Große Probleme stellen gemischte Kunststoffabfälle aus Haushaltsabfällen und aus Autowracks dar. Eine praktikable Lösung ist noch nicht gefunden. Bis auf wenige Ausnahmen erfüllen Sekundärprodukte aus rückgewonnen Kunststoffgemischen die Qualitätsansprüche des Marktes wenig oder nicht.

Für einzelne Kunststoffe und Problembereiche zeichnen sich allerdings aufgrund vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten Resultate ab.

Die hier vorgelegte Arbeit gibt einen Überblick über wesentliche Probleme, Lösungsansätze und Lösungen in diesem komplexen Bereich.

Kunststoffrecycling ist noch voller chemischer, technischer und wirtschaftlicher Probleme. Die Autoren präsentieren hier aber Vorschläge und Entwicklungen, die

wesentlich zur Lösung eines Teils dieser schwierigen Aufgaben beitragen können. Dabei bleiben die Autoren offen und realitätsnah, sie scheuen sich nicht, auch auf Mißerfolge und Ursachen hinzuweisen.

Nach einer Einführung in die Problematik werden die Themen Sammlung von Kunststoffabfällen, Probleme aus Verunreinigung, Mischung und Additiven, Maßnahmen zur Optimierung, technische Grundlagen der Aufbereitung durch Zerkleinern, Sortieren, Schmelzen, Pyrolyse und Hydrolyse vorgestellt.

Die Autoren haben sich der Aufgabe unterzogen, die vielfältigen Informationen über das Kunststoffrecycling zusammenzutragen und geordnet zu präsentieren. Für diese Mühe werden alle dankbar sein, die sich vor die Aufgabe gestellt sehen, über die Einführung des Kunststoffrecycling zu entscheiden, dies durchzuführen und die Produkte zu vermarkten. Es werden praxisrelevante Informationen wie technische Beschreibungen, Angaben zur Wirtschaftlichkeit und Anschriften gegeben. Dieses Kompendium wendet sich an Entscheidungsträger, Planer, Entsorgungspflichtige, Besitzer von Kunststoffabfällen und auch an die Kunststoffhersteller und -verarbeiter als die Mitverursacher des Problems. Die dargestellten Lösungsansätze sowie organisatorischen und technischen Maßnahmen stellen wertvolle Hinweise zur weiteren Entwicklung des Kunststoffrecycling dar. Auch können hier Hinweise zur weiteren Befassung mit Forschung und Entwicklung auf diesem beschwerlichen Teilgebiet der Abfallwirtschaft entnommen werden.

Prof. Dr.-Ing. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Institut für Technischen Umweltschutz
– Fachgebiet Abfallwirtschaft –
TU Berlin

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5	5 Technische Grundlagen und Verfahren ..	30
Inhaltsverzeichnis	7	5.1 Zerkleinern	30
1 Einleitung	9	5.2 Klassieren	31
1.1 Definition von Kunststoffen	9	5.2.1 Sieben	32
1.2 Die häufigsten Kunststoffarten	9	5.2.2 Sichten	32
1.3 Produktion und Verbrauch von Kunststoffen	10	5.3 Sortierung	33
1.4 Definition und Charakterisierung der Kunststoffabfälle	13	5.3.1 Dichtesortierung	33
1.5 Kunststoffabfälle aus Haushalten und Gewerbe	13	5.3.2 Flotation	34
1.6 Umweltauswirkungen durch die Abfallentsorgung	15	5.3.3 Elektrostatische Sortierung	34
1.6.1 Deponie	16	5.3.4 Automatische Klauerverfahren	35
1.6.2 Müllverbrennung	17	5.4 Schmelze	35
1.6.3 Kompostierung	17	5.4.1 Granulieren	35
2 Sammlung von Kunststoffabfällen	18	5.4.2 Extrudieren	35
2.1 Vermittlung durch Abfallbörsen	18	5.4.3 Schäumen	35
2.2 Sammlung von Kunststoffabfällen aus Haushalten	19	5.4.4 Spritzgießen	36
2.2.1 Holsystem	19	5.4.5 Pressen	37
2.2.2 Bringsystem	19	5.4.6 Abluftbehandlung	37
2.3 Beispiele für die Sammlung von Kunststoffen aus Haus- und Gewerbemüll	20	5.4.6.1 Chemische Grundlagen der Abluftbehandlung	37
2.3.1 Sammlungen in der Bundesrepublik Deutschland	20	5.4.6.2 Verfahrensbeschreibung	38
2.3.2 Sammlungen in anderen Ländern	21	5.5 Pyrolyse	39
3 Grundlagen und Probleme	22	5.5.1 Produkte und Eigenschaften	39
3.1 Einfluß von Verunreinigungen auf die Wiederverwertung	22	5.5.1.1 Pyrolyseruß oder -koks	39
3.2 Einfluß von Kunststoffmischungen auf die Wiederverwertung	22	5.5.1.2 Pyrolyseöl	40
3.3 Additive in Kunststoffen und deren Auswirkung auf das Recycling	23	5.5.1.3 Pyrolysegas	40
4 Maßnahmen zur Optimierung	25	5.5.2 Pyrolyse verschiedener Abfallstoffe	40
4.1 Veränderung der Produktgestaltung	25	5.5.2.1 Sortenreine Kunststoffabfälle	40
4.2 Kennzeichnung von Kunststoffen	25	5.5.2.2 Gemischte Kunststoffabfälle	41
4.3 Qualitätskriterien von Sekundärkunststoffen	26	5.5.2.3 Verunreinigte Kunststoffabfälle	41
4.3.1 Materialprüfung	26	5.5.2.4 Altreifen	41
4.3.2 Materialeigenschaften	26	5.5.3 Pyrolyseanlage ABB	42
4.3.3 Mikroskopische Materialprüfung	27	5.5.4 Partielle Oxidation	42
4.3.4 Qualitätsstandards für Sekundärstoffe	27	5.5.5 Wirtschaftlichkeit	43
4.4 Entwicklung und Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen	27	5.6 Hydrolyse	43
4.5 Beschränkung und Ersatz von Einwegsystemen	28	5.6.1 Hydrolyse von Schaumstoffabfällen	43
4.6 Direkte Wiederverwertung von Duroplastabfällen	29	5.6.2 Produkte und Eigenschaften	44
		5.7 Aufbereitungsverfahren	45
		5.7.1 Amberger Kaolinwerke	47
		5.7.2 Andritz	48
		5.7.3 B.u.B. Anlagenbau	50
		5.7.4 Göschl	50
		5.7.5 Herbold	52
		5.7.6 REAL	53
		5.7.7 Recycloplast	55
		5.7.8 RGR	57
		5.7.9 Wormser Kunststoff Recycling	58
		5.7.10 Zusammenstellung der Verfahren	59
		6 Ausblick	60
		7 Literaturverzeichnis	62

1 Einleitung

In der Bundesrepublik werden jährlich mehr als 7 Mio Mg Kunststoffe produziert. Davon werden gut 4 Mio Mg als Kunststoffprodukte in der Bundesrepublik verkauft.

Rund 2 Mio Mg fallen als Kunststoffabfälle zur Entsorgung an. 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 "Kunststoff-verbrauchenden"-Industrien (Handel, Getränke, Landwirtschaft) hat sich in den letzten fünf Jahren auf rund 500.000 Mg verdreifacht. In diesem Bereich wird bereits heute ein erheblicher Anteil der Abfälle sinnvoll recycelt.

Seit etwa fünf 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. Dennoch wurden Verfahren entwickelt, mit denen diese Abfälle verwertet werden können.

1.1 Definition von Kunststoffen

Kunststoffe sind Werkstoffe, die synthetisch aus einfachen organischen Naturstoffen hergestellt (z.B. Alkohol, Benzol, Methan) oder aus komplexen, in der Natur vorkommenden Grundstoffen (z.B. Kautschuk) aufgebaut werden.

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

Für die Herstellung von Kunststoffen aus natürlichen Grundstoffen werden diese durch chemische Abwandlung technisch nutzbar gemacht. Als Naturprodukte 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

Bei den Kunststoffen werden drei Hauptgruppen unterschieden:

- Thermoplaste,
- Duroplaste,
- Elastomere.

Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus linearen oder verzweigten 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 ent-

standen ist, können Thermoplaste mehrfach regeneriert und erneut über die Schmelze verarbeitet werden.

Duroplastische Kunststoffe bestehen aus fließfähigen, monomeren Vorprodukten, 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 thermochemischen 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 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. 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.

Polyvinylchlorid (PVC) gehört zur Gruppe der halogenierten Polymere. Zur Gewährleistung der vielfältigen Anwendungen müssen dem PVC unterschiedlichste, größtenteils umweltgefährdende Additive zugemischt werden (vgl. Abschn. 3.3).

Polystyrol (PS) ist der älteste durch Additionspolymerisation als Kettenreaktion gewonnene Thermoplast. PS besteht aus einer Hauptkette und Phenylringen, die als Polymer eine Einheit bilden.

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

Lineare Polyester aus aliphatischen Dicarbonsäuren (z.B. Adipinsäure) können wegen des niederen Erweichungsbereiches nicht direkt verwendet werden. Diese 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

Tabelle 1.1
Einsatzbereiche und chemische Formeln von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren

Kunststoff	Kürzel	Chemische Formel	Einsatzbereiche
Thermoplaste			
Polyethylen	PE	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Folien, Formkörper, Massenartikel
Polypropylen	PP	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	techn. Teile, z.B. im KFZ
Polyvinylchlorid	PVC	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$	Folien, Fensterrahmen, Rohre, Kabelisolierung
Polystyrol	PS	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n$	Einwegbecher, glasklare Haushaltgegenstände, Spritzgußteile
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
Duroplaste			
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	$\left[\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2 \right]_n$	Lacke, Gießharz, Klebstoffe
Phenolharz	PF	$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})_2-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})_2-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})_2-\text{OH}$	el. Isolierstoffe, Hartfaserplatten, Gieß- und Lackharze, Holzleim
Melaminharz	MF	$\text{Hexamethylolmelamin}$ $\text{HOCH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{OH})_2\text{C}_6\text{H}_2(\text{N}(\text{CH}_2\text{OH})_2)_3$	Bindemittel für Preßmassen, Holzleim, Lacke
Harnstoffharz	UF	$\text{Dime-thylol-harnstoff}$ $\text{O}=\text{C}(\text{NHCH}_2\text{OH})_2$	Bindemittel für Preßmassen, Holzleim, Lacke
Polyurethan	PUR	$\left[(\text{CH}_2)_4-\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-\text{O} \right]_n$	Gieß- und Streichmassen, Schaumstoffe, Lacke
Elastomere			
Naturkautschuk	NR	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{CH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{CH}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-$	Weich- und Hartgummi, Schläuche, Dichtungen
Styrol-Butadien-Kautschuk	SBR	$-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-$	Autoreifen
Polybutadien	BR	$-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$	Autoreifen, Auskleidungen, Isoliermaterial
Polychlorpropen	CR	$-\text{CH}=\underset{\text{Cl}}{\text{C}}-\text{CH}=\text{CH}_2-$	Förderbänder, Kabelummantelung, Schaumgummi, Schutzkleidung

herzustellen. Diese Beimischungen werden ganz allgemein als "Additive" bezeichnet (vgl. Abschn. 3.3). Die meisten Anwendungszwecke erfordern vielseitig, stoffspezifisch aufgebaute Hilfsstoff-Systeme. 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.

1.3 Produktion und Verbrauch von Kunststoffen

Die Bundesrepublik Deutschland ist weltweit der drittgrößte Produzent und Verarbeiter von Kunststoffen. Der Weltumsatz an Kunststofferzeugnissen betrug 1985 120 - 130 Mrd. US\$. Daran hatten die USA einen Anteil von 38 %, Japan 24 % und die Bundesrepublik knapp 10 %. Die Aufteilung der Produktionsmengen zeigt Bild 1.1.

Die überwiegende Zahl der Kunststoffe wird aus Erdöl,

Bild 1.1
Weltproduktion von Kunststoffen
1984/85 [33]

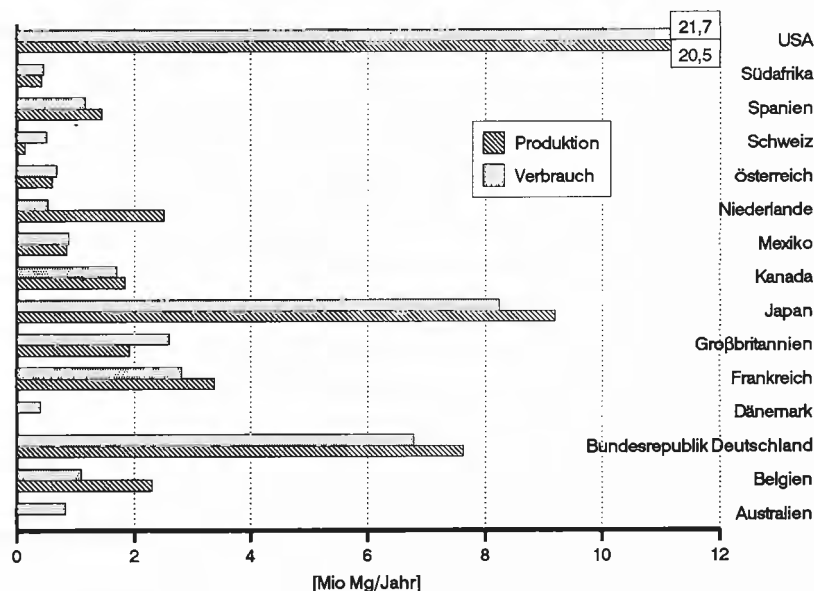
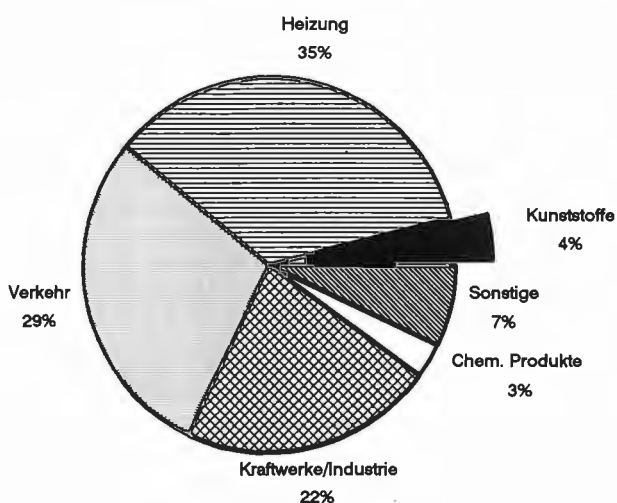


Bild 1.2
Aufteilung des Mineralölverbrauchs der Bundesrepublik nach Verbrauchssektoren [82]



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 1986 in der Bundesrepublik produzierten 7,5 Mio Mg Kunststoffen waren 6,9 Mio Mg zum Verkauf bestimmt (Tabelle 1.2). Mengenmäßig von Bedeutung sind vor allem Polymerisationsprodukte, die am Gesamtkunststoffverbrauch einen Anteil von 67 % hatten. 30 % entfielen auf Polykondensate und Polyadditionsprodukte.

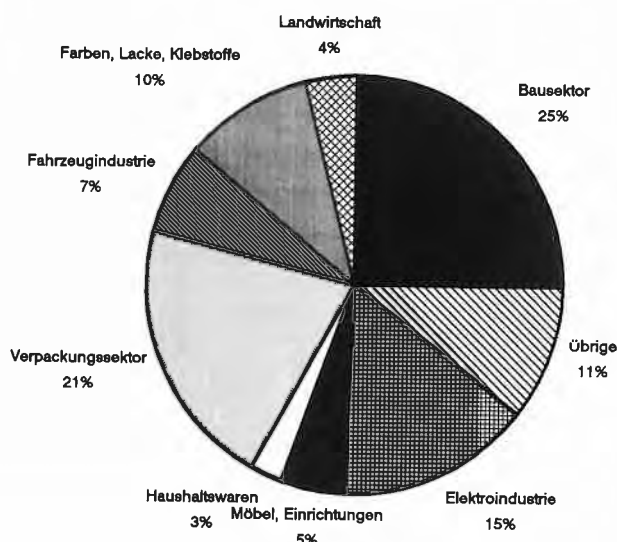
Tabelle 1.2
Zum Verkauf bestimmte Kunststoffproduktion in der Bundesrepublik in den Jahren 1984 bis 1986 (in 1.000 Mg) [75]

Produktgruppe	1984	1985	1986	Anteil 1986
Polykondensate, -additionsprodukte	1.994	2.052	2.072	30,1%
Polymerisations-, Mischprodukte	4.360	4.399	4.610	66,9%
davon Polyethylen	1.310	1.239	1.266	18,4%
Polyvinylchlorid	1.050	1.132	1.163	16,9%
Sonstige	221	229	212	3,1%
Gesamt	6.575	6.680	6.894	100,0%

Tabelle 1.3 enthält eine Zusammenstellung der Einsatzgebiete von Thermoplasten im Haushaltsbereich. Die Nutzung der Kunststoffe erfolgt zu 25 % im Bausektor und zu 21 % für Verpackungen (Bild 1.3). Weitere wichtige Einsatzbereiche sind die Elektro-, Fahrzeug- und Möbelindustrie sowie die Landwirtschaft.

Im Bausektor werden Erzeugnisse aus Kunststoffen überwiegend als langlebige Produkte eingesetzt. Verpackungen dagegen sind im allgemeinen Produkte mit

Bild 1.3
Einsatzgebiete von Kunststoffen [71]



Anwendungsbeispiel	Kunststoffe
Geschirr, Besteck, Küchenmaschinenteile und Gehäuse	PE, PP, PVC, PA, PS, PC
Tischdecken, Verkleidungen	PVC (weich)
Badezimmerausstattungen	PVC
Verpackungsfolien	PE
Tragetaschen	PE, PVC
Kaschierfolien für Beutel	PP
Dichte Verbundfolien für Lebensmittel	PE (Aluminium), PETP
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
Hohlkörper (Großbehälter, Flaschen, Kanister)	PE, PP, PVC

Tabelle 1.3
Anwendungsbeispiele von Massenkunststoffen im Haushaltsbereich

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 [18] bis zum Jahr 1984 auf 1,5 Mio. Mg angewachsen. Davon entfielen 74 % auf Packmittel und 26 % auf Halbzeugfolien.

Der Anteil von Kunststoffverpackungen an der Gesamtproduktion von Kunststoffen erhöhte sich zwischen 1960 und 1973 von 16 % auf 33 % (Bild 1.4). Seit 1973 jedoch ist der Anteil innerhalb gewisser Schwankungsbreiten konstant.

Folien, Beutel und Tüten haben einen Anteil von 56-57 % an der Produktion von Kunststoffverpackungen. Auf Flaschen mit einem Volumen unter 2 l entfallen 6 %, auf Becher etwa 7 %.

Der Anteil von Polyethylen an der Packmittelproduktion belief sich 1984 auf 66 %. Es folgten Polystyrol mit 12 %, Polypropylen mit 10 % und PVC mit 9 % [18].

Seit etwa 10 Jahren ist eine weitere Kunststoffart, das Polyethylenterephthalat (PET oder PETP), auf dem Markt. Dieser Kunststoff wird insbesondere als Konkurrenzprodukt zur Getränkeglasflasche eingesetzt. Hierbei wird vor allem der gewichtsmäßige Vorteil der PET-Flasche zur Glasflasche von 1:20 angeführt. Ausgehend



Bild 1.4
Entwicklung des Anteils der Kunststoffverpackungen bezogen auf die Gesamtproduktion von Kunststoffprodukten [18]

Tabelle 1.4
PET-Verbrauch weltweit
(in 1.000 Mg)

Jahr	USA	Europa	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	150	200	750
1990	440	190	250	880

von den USA findet die PET-Flasche in Europa, unter anderem auch in der Bundesrepublik, größere Verbreitung (Tabelle 1.4).

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. Dabei entstehen einerseits Reststoffe, die einem innerbetrieblichen Recycling zugeführt werden, d.h. in den ursprünglichen Prozeß direkt wieder eingegliedert werden. Andererseits fallen Stoffe an, die an Aufbereitungsbetriebe abgegeben oder als industrieller Abfall entsorgt werden müssen. Alle Materialströme weisen in sich eine hohe Reinheit bzw. Homogenität auf.
- Kunststoffverarbeitung und -aufbereitung: Hierunter fällt eine Vielzahl kleiner und mittlerer Betriebe verschiedener kunststoffverarbeitender Wirtschaftszweige, wie z.B. KFZ-Hersteller, die Elektro- oder Spielwarenindustrie sowie Betriebe, die innerbetrieblich nicht nutzbare Kunststoffabfälle aufbereiten.

Die von den Rohstoffherzeugern bereitgestellten oder importierten Rohmaterialien werden zu Halbzeugen oder Fertigprodukten verarbeitet.

Die Aufbereitungsbetriebe erhalten ihr Ausgangsmaterial sowohl aus dem industriell/gewerblichen als auch aus dem privaten Bereich. Ein Teil der in dieser Ebene anfallenden Reststoffe unterliegt dem innerbetrieblichen Recycling, ein weiterer Teil wird durch die Aufbereitungsbetriebe verwertet. Schließlich entstehen Abfälle, die zu beseitigen sind. 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.

- Weiterverarbeitende Betriebe, gewerbliche Endverbraucher und private Haushalte: Unter weiterverarbei-

tende 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 Abfall beseitigt und nur in wenigen Fällen den kunststoffaufbereitenden Betrieben zugeführt. Die Zusammensetzung der Reststoffe ist im allgemeinen nicht bekannt. Zudem fallen meist Reste verschiedener Erzeugnisse gleichzeitig an und werden nicht getrennt.

Im privaten Bereich fallen eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte und Kunststoffarten gleichzeitig an. Ein Großteil dieser Kunststoffe dient als Verpackung und ist meist zusätzlich mit dem Packungsinhalt verunreinigt.

1.5 Kunststoffabfälle aus Haushalten und Gewerbe

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

Nicht einheitlich definiert dagegen ist bisher der Begriff des Gewerbemülls. Dabei erscheint es besonders bei den Kunststoffabfällen sinnvoll, eine Trennung von Abfällen aus der Kunststoffproduktion und der Kunststoffverarbeitung einerseits und andererseits von Kunststoffen, die infolge der Verwendung zu Abfällen werden, 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 [8,9] ergab sich für 1985 eine Abfallmenge an Kunststoffen aus Privathaushalten von 756.000 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 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.

Ca. 90 % der im Haushaltsabfall enthaltenen Kunststoffe bestehen aus den vier Massenkunststoffen PE,

Parameter	Einheit	Haushaltsabfall		
		1979/80	1985	Änderung
Hausmüllmenge	1.000 Mg/a	15.000	14.000	- 7 %
Kunststoffmenge	1.000 Mg/a	915	756	- 21 %
Kunststoffanteil	Gew.-%	6,1	5,4	- 13 %

Tabelle 1.5
Abfallmenge und Kunststoffanteil
in der Bundesrepublik Deutsch-
land für 1979/80 und 1985 [8,74]

Kunststoffart	Anteil nach [71] 1984	Anteil nach [49] k.A.	Anteil nach [43]* 1986
PE/PP	67 %	65 %	52 %
PS	16 %	15 %	23 %
PVC	12 %	10 %	14 %
Sonstige	5 %	10 %	11 %
Gesamt	100 %	100 %	100 %

Tabelle 1.6
Verteilung der Kunststoffarten im
Haushaltsabfall

* bezogen auf die bei getrennter Sammlung wiedergewinnbaren Anteile

PP, PS und PVC (Tabelle 1.6). Der größte Anteil entfällt dabei auf die Fraktion PE/PP mit 50 bis 65 %.

In Abfällen sind vorwiegend Produkte aus thermoplastischen Massenkunststoffen zu finden. Spezialkunststoffe thermoplastischer und duroplastischer Art werden für hochwertige, d.h. langlebige Gebrauchsgüter verwendet (Bausektor, KFZ-Branche, Elektroindustrie). Diese sind jedoch bislang noch weitgehend im Wirtschaftskreislauf enthalten.

Entsprechend dem jeweiligen Verwendungszweck lassen sich Kunststoffprodukte in kurzlebige (Nutzungsdauer < 1 Jahr) und langlebige (Nutzungsdauer > 1 Jahr) Erzeugnisse einteilen [27]:

- 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 1.5).

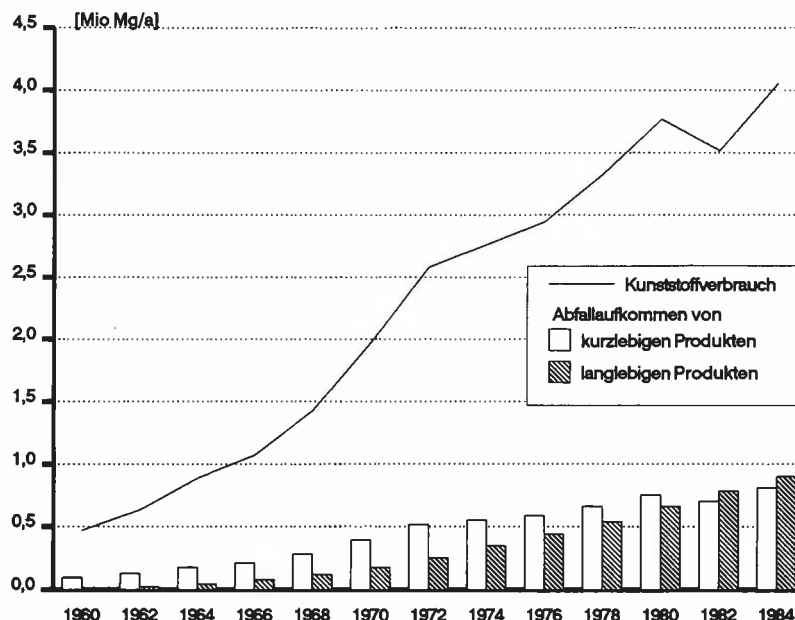
Das Abfallaufkommen aus Kunststoffherzeugnissen stieg von weniger als 0,1 Mio Mg im Jahr 1960 auf fast 1,8 Mio Mg im Jahr 1985 (Bild 1.5).

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

Jahr	Verbrauch an Kunststoff- erzeugnissen	Abfallaufkommen		Gesamt
		kurzlebige Produkte	langlebige Produkte	
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

Tabelle 1.7
Inlandsverbrauch und Abfallauf-
kommen von Kunststoffproduk-
ten zwischen 1960 und 1985 (in
1000 Mg)

Bild 1.5
Entwicklung des Inlandverbrauchs und des Abfallaufkommens von Kunststoffergezeugnissen



den kurzlebigen Erzeugnissen im Abfall. Bis 1980 überwog der Anteil der kurzlebigen Produkte im Abfall; der Anteil ist seitdem auf 46 % zurückgegangen.

Zwischen 1960 und 1985 wurden in der Bundesrepublik ca. 61 Mio Mg an Kunststoffergezeugnissen verbraucht. Als Abfall sind im gleichen Zeitraum dagegen lediglich 21 Mio Mg angefallen (Bild 1.6). 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.

Aufgrund der hohen Nutzungsdauer dieser Warengruppen wird die Abfallmenge in den nächsten Jahren deutlich stärker wachsen als der Verbrauch an Kunststoffen. Nach einer Prognose von ARGUS [18] 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

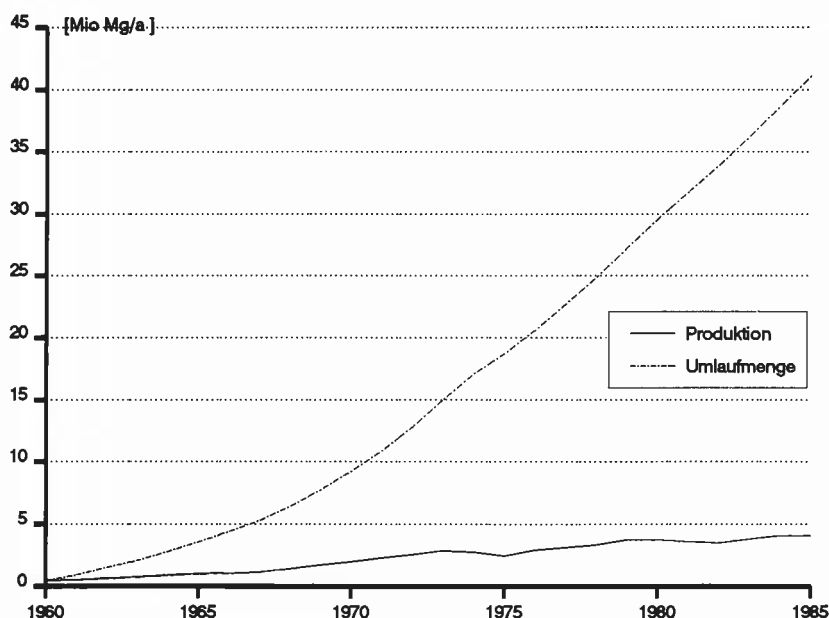
zunimmt. Die langlebigen Erzeugnisse werden dann einen Anteil im Abfall von 60 % aufweisen (Bild 1.7).

Tabelle 1.8 zeigt eine Gegenüberstellung der Produktion von Kunststoffergezeugnissen sowie das Aufkommen getrennt nach Hausmüll sowie Gewerbe- und Sperrmüll in Abhängigkeit von der Produktlebensdauer. Auffällig ist die unterschiedliche Verteilung von kurzlebigen Gütern im Haus- und Gewerbemüll. Im Haushaltsabfall betrug der Anteil 84 %. Im hausmüllähnlichen Abfall dagegen überwiegen die langlebigen Produkte mit 77 %.

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 auf die Behandlungsverfahren und Anlagenstandorte, wie z.B. Behandlungskosten, -aufwand und Produktqualität.

Bild 1.6
Im Umlauf befindliche Kunststoffmenge in der Bundesrepublik Deutschland



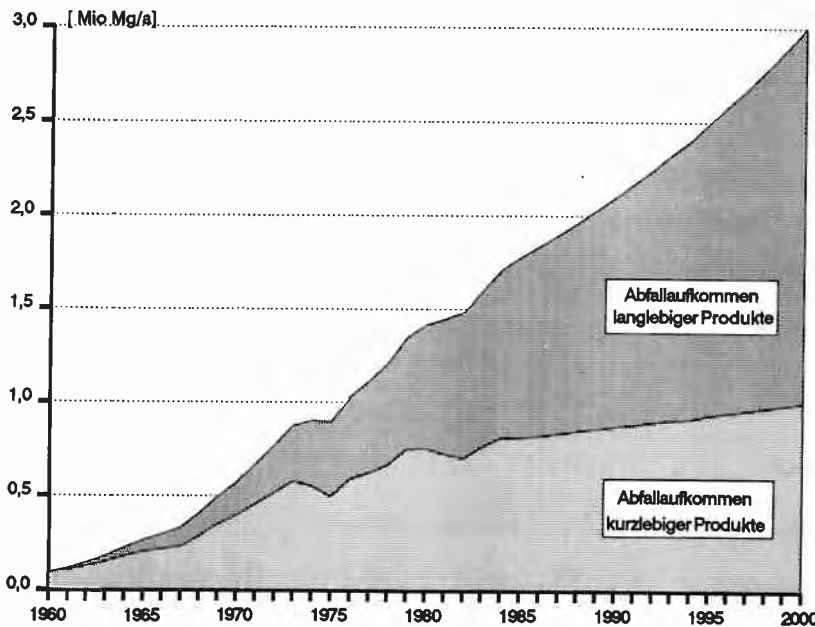


Bild 1.7
Aufteilung des Aufkommens an Kunststoffabfällen nach der Produktlebensdauer in [Mio Mg/a]

Lebensdauer	Produktion		Hausmüll		Abfallaufkommen Gewerbe-/Sperrmüll		Gesamt	
< 1 Jahr	860	20%	602	33%	258	14%	860	47%
> 1 Jahr	3.470	80%	113	6%	847	47%	960	53%
Gesamt	4.330	100%	715	39%	1.105	61%	1.820	100%

Tabelle 1.8
Produktionsmenge von Kunststoffen und Abfallmenge nach Abfallarten für 1985 in [1.000 Mg] [18]

Die letzten vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Zahlen über die Art der Abfallbeseitigung nach einzelnen Anlagenarten stammen aus dem Jahr 1984 (Tabelle 1.9). Zu diesem Zeitpunkt wurden drei Viertel aller Siedlungsabfälle deponiert, 24 % verbrannt, 2 % zu Kompost verarbeitet und 1 % auf sonstige Weise behandelt. Durch die Inbetriebnahme weiterer Müllverbrennungsanlagen nach 1982 waren 1986 bereits 35 % der Bevölkerung an Verbrennungsanlagen angeschlossen, was einer jährlichen Verbrennungsleistung von etwa 8 Mio Mg an Abfällen entspricht [10]. Der Anteil der Deponierung sank demnach in vier Jahren von 75 % auf 70 %.

Zwischen 1977 und 1984 fielen jeweils etwa 23 Mio Mg/a Haushalts- und haushaltsähnliche Abfälle an. Wird der Kunststoffgehalt auf 6 % geschätzt, so ergibt sich eine zu entsorgende Kunststoffmenge von ca. 1,4 Mio Mg/a. Bezogen auf die einzelnen Behandlungsverfahren ergibt sich die folgende Situation (Tabelle 1.10).

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 Mio Mg an Kunststoffen auf Deponien abgelagert (vgl. Tabelle 1.10). Die bislang eingesetzten Kunststoffe sind biologisch nicht abbaubar (vgl. Abschn. 4.4). Es ist allerdings nicht bekannt, ob einzelne Bestandteile der abgelagerten Kunststoffe (z.B. Farbpigmente, Weichmacher) unter ungünstigen Bedingungen im Laufe der Zeit herausgelöst werden können. Kunststoffe verursachen bei normalem Deponiebetrieb praktisch keine flüssigen oder gasförmigen Emissionen. Lediglich bei Schwelbränden ist mit unkontrollierten Emissionen zu rechnen.

In einem dichtbesiedelten Gebiet wie der Bundesrepublik sind Deponiestandorte knapp. Immer geringer werden die

Anlagenart	1982		1984		1985 (geschätzt)	
	Menge 1.000 Mg/a	Anteil Gew.-%	Menge 1.000 Mg/a	Anteil Gew.-%	Menge 1.000 Mg/a	Anteil Gew.-%
Deponien	21.612	75,0	21.704	73,3	20.000	70
Müllverbrennung	6.340	22,0	7.185	24,3	8.000	28
Kompostwerke	462	1,6	546	1,8	450	1
Sonstige	387	1,4	169	0,6	400	1
Gesamt	28.801	100,0	29.604	100,0	29.000	100

Tabelle 1.9
Abfallbeseitigung von Siedlungsabfällen nach Anlagenarten im Jahr 1982 [74,80] und 1985 (geschätzt)(incl. 5,7 Mio Mg/a Straßenkehrschutt und Marktabfälle)

Tabelle 1.10
Beseitigung der Kunststoffabfälle
nach Anlagenarten für 1985/86

Anlagenart	Menge 1.000 Mg/a	Anteil Gew.-%
Deponien	980	69
Abfallverbrennungsanlagen	400	28
Kompostwerke	20	1,5
Sonstige	20	1,5
Gesamt	1.420	100

für Deponien infrage kommenden Flächen, ständig wachsenden 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.

Tabelle 1.11
Daten zur Berechnung des Beitrags der Kunststoffe an der HCl-Rohgasfracht

Parameter	Einheit	Größe
Verbrannte Abfälle	Mio Mg/a	8
Kunststoffanteil im Abfall	Gew.-%	6
PVC-Anteil im Kunststoff	Gew.-%	10
Chlor-Anteil im PVC	Gew.-%	56
Jahresfracht HCl im Rohgas	1.000 Mg/a	30 - 35

Eine vollständige Entfernung der Kunststoffe bedeutete aus heutiger Sicht, da fast alle Anlagen mit Rauchgasreinigungssystemen ausgestattet sind, daß die Reinigungssysteme zwar nicht überflüssig wären, aber präziser auf die Abscheidung anderer schädlicher Rauchgaskomponenten ausgelegt werden könnten und die entstehenden Reststoffmengen der Rauchgasreinigung vermindert würden.

Ob Dioxinemissionen durch den Kunststoffeintrag verursacht werden, ist bislang ungeklärt und umstritten. Dagegen spricht einerseits, daß eine zu Versuchszwecken erfolgte Erhöhung des PVC-Anteils auf ein Mehrfaches der Normalwerte keine erhöhten Dioxin-Werte erbrachte. Andererseits zeigt sich, daß rein rechnerisch mit dem im Abfall enthaltenen Kochsalz ausreichend Chlor in die Verbrennungsanlage eingetragen wird, um die in den Dioxinen enthaltenen Chlorfrachten bereitzustellen.

1.6.3 Kompostierung

Kunststoffe im Kompost sind wie Glas und Metall weitestgehend inert im Verrottungsprozeß und deshalb Störstoffe, die mit großem organisatorischen und technischen Aufwand entfernt werden müssen. Das Problem der Kunststoffe liegt dabei nicht in eventuellen physiolo-

1.6.2 Müllverbrennung

Die Kunststofffraktion trägt mit einem spezifischem Heizwert von 30.300 kJ/kg [15] 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 UBA sogar eine Steigerung des Heizwertes um ca. 5 % [10]. 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 [43].

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 Kunststoffen werden neben Energie auch Schadstoffe in Form von HCl, diversen Schwermetallen und organischen Stoffen, wie z.B. Dioxine und Furane, freigesetzt. Aufgrund der PVC-Mengen, die verbrannt werden, 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 1.11).

gischen (Schad-)Wirkungen eines kunststoffverunreinigten Kompostes, sondern in der optischen Wahrnehmbarkeit im Fertigprodukt. Kompost aus Abfällen ist meist ein sehr schwer vermarktbare Produkt wegen der tatsächlich oder mutmaßlich enthaltenen Schadstoffe (z.B. Schwermetalle, PAH), die nur auf analytischem Wege feststellbar sind. Zusätzlich sichtbare Verunreinigungen erschweren daher den Verkauf des Müllkompostes.

Organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung von Kunststoffen im Kompostrohstoff (Abfall) zielen auf die Verwendung von organischen Abfällen, die einen geringen Anteil an Kunststoffen haben oder sogar frei davon sind (Garten-/Parkabfälle, Hausmüll aus Gebieten mit getrennter Sammlung von Kunststoffen). Der Erfolg dieser Maßnahmen ist regional unterschiedlich und häufig recht gering.

Bei der Kompostierung von Hausmüll müssen neben Kunststoffen auch andere inerte Fraktionen durch Aufbereitungsschritte entfernt oder unsichtbar gemacht werden. Kunststoffe werden als Leichtstoffe gemeinsam mit Papier in Windsichtern oder ähnlichen Aggregaten abgetrennt. Sofern diese Leichtfraktion nicht als BRAM (Brennstoff aus Müll) zur Energiegewinnung herangezogen wird, tragen Kunststoffe zur Erhöhung der nicht nutzbaren Reststoffmenge bei, die deponiert werden muß.

2 Sammlung von Kunststoffabfällen

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

Ziel einer auf ein Recycling ausgelegten Sammlung muß es sein, die Kunststoffe separat von anderen Müllbestandteilen beim Abfallproduzenten zu entsorgen. Auf industrieller Ebene wird außerdem eine Unterteilung nach einzelnen Kunststoffarten in vielen Fällen wirtschaftlich sein.

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

2.1 Vermittlung durch Abfallbörsen

Häufig können gewerbliche Abfälle nicht recycelt werden, weil der Abfallbesitzer die Reststoffe nicht selber 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.

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, entsprechend einer Menge von 140 auf 355 Mg, gesteigert werden.

Bild 2.1 zeigt die Entwicklung der Abfallbörse beim Deutschen Industrie- und Handelstag DIHT (Dachverband der Industrie- und Handelskammern) innerhalb der letzten sieben Jahre. Die Zahl der Angebote hat sich 1986 mit 600 Angeboten gegenüber 1979 mehr als verdoppelt, während die Zahl der Nachfragen von 212 im Jahre 1979 auf 375 im Jahre 1986 gestiegen ist. Eine Auswertung 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 Kunststoffässern, die einmalig anfallen, über Produktionsrückstände von 15 - 20 Mg/Monat bis zu fast beliebig großen Mengen (Angebotstext: "jede Menge, regelmäßiger Anfall") an PE/PP-Folien und Mahlgut [24].

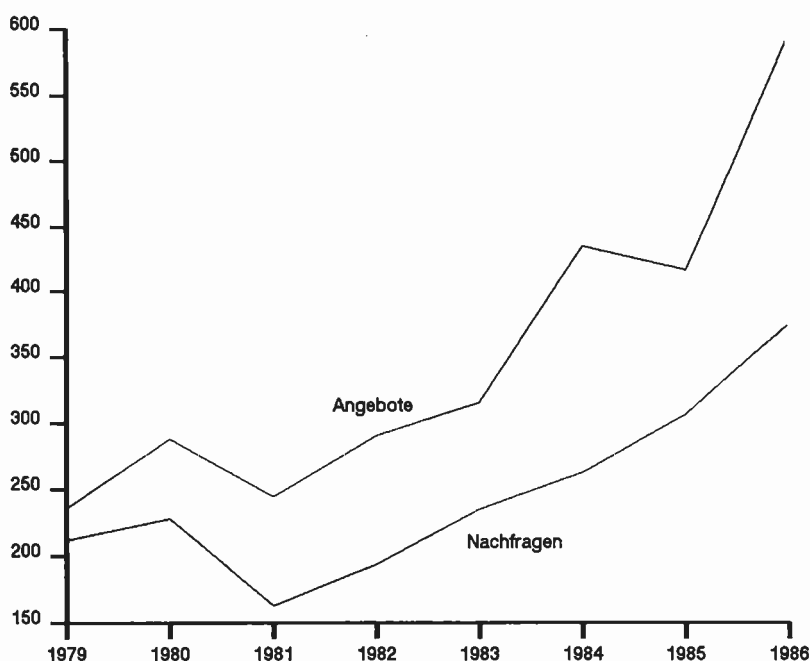


Bild 2.1
Entwicklung von Angeboten und Nachfragen hinsichtlich Kunststoffabfällen bei der Abfallbörse des DIHT zwischen 1979 und 1986 [24]

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..

2.2 Sammlung von Kunststoffabfällen aus Haushalten

Die in Privathaushalten anfallenden Kunststoffe werden bislang überwiegend zusammen mit dem übrigen Hausmüll den verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen zugeführt. Dies führt dazu, daß die Kunststoffe während der Sammlung mit den übrigen Müllbestandteilen vermischt werden, was wegen der damit verbundenen Verschmutzung zu Qualitätseinbußen führt.

In den letzten Jahren sind eine Reihe von Sammelsystemen entwickelt worden, um Wertstoffe aus dem Hausmüll mit geringerem Aufwand und größerer Reinheit als in Hausmüllsortieranlagen möglich getrennt zu erfassen.

Diese Systeme lassen sich unterscheiden nach

- integrierten Sammelsystemen und
- additiven Sammelsystemen.

Integrierte Sammelsysteme zur Wertstofferrfassung erfordern eine weitgehende Umstellung der konventionellen Abfallsammlung. Dies bedeutet eine Abwendung von einer Mülltonne für alle Abfälle hin zu mehreren Abfallsammelgefäßen für jeweils einzelne Abfallgruppen. Ein Teil der Gefäße wird mit getrennt gesammelten Wertstoffen gefüllt, die einer Verwertung zugeführt werden, während die übrigen Abfälle Abfallbehandlungsanlagen zugeführt werden. Die Wertstoffe werden damit parallel zu dem Restmüll abgeholt (Holsystem).

Additive Systeme sind unabhängig von der konventionellen Abfallsammlung. Diese basieren auf der Bereitschaft der Bevölkerung, Wertstoffe zu den Sammelstellen (Container, Recyclinghöfe) hinzubringen (Bringsystem).

2.2.1 Holsystem

Im Holsystem erfolgt flächendeckend für ein fest umrissenes Gebiet die Umstellung der Abfallsammlung von einem auf mehrere Sammelgefäße (Sammelbegriff "Grüne Tonne"). Die Variationsbreite ist dabei beliebig groß. Es gibt 2-Behälter- bis 5-Behälter-Systeme mit gleichzeitiger oder alternierender Abfuhr der Behälter, mit gemeinsamer oder getrennter Sammlung verschiedener Wertstoffe oder der Möglichkeit der Verwendung von Einweg-Sammelgefäßen (Kunststoff- oder Papiersäcken) für einzelne Wertstoffe.

Kunststoffe fallen dabei entweder in einem Wertstoffgemisch mit Papier/Pappe, Glas oder Metallen an (Wertstofftonne) oder werden separat in Beuteln von jedem Haushalt einzeln eingesammelt.

Der erforderliche Sammelaufwand der an dieses System angeschlossenen Einwohner ist gering. Mit dem Holsystem läßt sich im Vergleich zum Bringsystem eine höhere Menge an Kunststoffen erfassen. In einem Versuchsgebiet, in dem allein Kunststoffe getrennt in Beuteln gesammelt wurden, lag die Erfassungsmenge bei 13,5 kg/Einwohner/a. Dies entspricht etwa 75 % der im Hausmüll enthaltenen Kunststoffe [43]. Die bei diesem Versuch festgestellte Zusammensetzung der

Tabelle 2.1

Ergebnisse einer Sortieranalyse im Holsystem in Hamburg-Bergedorf im Herbst 1986 [43]

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

gesammelten Kunststoffe ist in Tabelle 2.1 angegeben. Der Anteil an PE/PP ist mit 44 % geringer und der von PS mit 25 % höher als in vergleichbaren Untersuchungen (vgl. Abschn. 1.5.1).

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 - 14 DM/E·a bzw. 91 - 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 [70].

Bei der alleinigen 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 [11]. In anderen Versuchen werden Preisspannen von 2.000 - 3.000 DM/Mg genannt. Dies macht bereits nach überschlägiger Betrachtung deutlich, daß die Beutel-Sammlung im Holsystem unwirtschaftlich ist. Derartige Versuche wie in Hamburg werden i.d.R. nicht als Dauereinrichtungen weitergeführt.

2.2.2 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. Kunststoffe fallen bei diesem System als eigene Wertstofffraktion an.

Die erforderliche Motivation der Bevölkerung zur Sammlung der Wertstoffe innerhalb eines Bringsystems ist höher als im Holsystem. Dementsprechend geringer ist zumeist die tatsächliche Beteiligungsrate.

Die Sammelmenge je Einwohner betrug bei einem Versuch 1986 in Hamburg zwischen 0,5 und 1,5 kg/Jahr (± 3 % bis 8,5 % der im Abfall enthaltenen Kunststoffe) [43]. Das jeweilige Sammelergebnis wurde hierbei im wesentlichen vom Einzugsgebiet des einzelnen Containers beeinflusst. Die geringste Menge ergab sich bei aufgelockerter Bebauung und einer Containerdichte von > 4.000 E/C (Einwohner/Container). Die höchsten Sammelmenen ergaben sich in einem innerstädtischen Gebiet mit einer Containerdichte < 2.000 E/C sowie bei einer teilgewerblichen Nutzung

Tabelle 2.2
Ergebnisse einer Sortieranalyse im Bringsystem in
Hamburg-Bergedorf im Herbst 1986 [43]

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

der Container. Die geringe Erfassungsquote im Vergleich zum Holsystem ist hauptsächlich auf die verhältnismäßig geringe Beteiligung der Bevölkerung an der Sammlung zurückzuführen. Diese beteiligte Bevölkerungsgruppe wies jedoch mit 11,5 kg/Einwohner ein fast ebenso großes Sammelergebnis auf, wie die Teilnehmer im Holsystem. Die Zusammensetzung der gesammelten Kunststoffe gibt Tabelle 2.2 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 Sammlungskosten eines Bringsystems sind nicht bekannt. Nach Schätzungen betragen diese jedoch - in Analogie zur Altpapiersammlung unter Berücksichtigung des geringeren Schüttgewichts - 400 bis 700 DM/Mg

2.3 Beispiele für die Sammlung von Kunststoffen aus Haus- und Gewerbemüll

2.3.1 Sammlungen in der Bundesrepublik Deutschland

1979 Hersfeld-Rotenburg: getrennte Sammlung von Kunststoffen in Säcken. Die Bürgerbeteiligung lag mit ca. 11.000 Haushalten bei 30 - 40 %. In der Stadt wurden bessere Sammelergebnisse beobachtet als in ländlichen Gebieten.

Die Sammlung wurde auf Kunststoffflaschen und -dosen beschränkt. Schraubverschlüsse sollten vorher abgetrennt werden. Es konnte ein PE-Anteil in der Sammlung von 95 % erreicht werden. Der Versuch wurde 1981 fortgesetzt.

1981 Hersfeld-Rotenburg: Versuch mit vorher ausgegebenen Plastiksäcken, 11 Wochen Versuchsdauer, 15 - 45 % Erfassungsgrad, den Hauptanteil bildeten Folien.

1979 Schalksmühle: integrierte Wertstoff-Abfuhr (Sack im Behälter); die Wertstoffsäcke wurden der Haus-

müll-Abfuhr beigegeben und in einer Sortierstation abgetrennt. Der Versuch wurde nicht weiter verfolgt.

1980 Hannover: Hausmüll und Wertstoffe werden in Säcken gesammelt. Mit Zwei-Kammerfahrzeugen erfolgt ein getrenntes Erfassen und Abladen der Wert- und Reststoffe.

1984/87 Hamburg-Bergedorf: Pilotprojekt zur Kunststoffsammlung. Durch die Stadtreinigungsbetriebe werden an die Haushalte Säcke zur getrennten Kunststoffsammlung verteilt. Außerdem stehen in Teilen von Bergedorf 1,1 m³ Container für die Sammlung bereit. Die Säcke werden wöchentlich eingesammelt. Ab Dezember 1985 wurde die Sammlung von 4.000 auf 8.000 Haushalte ausgedehnt.

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

Wirtschaftlichkeit [83]:

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

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

1980 Radolfzell-Böhringen: 3-monatiger Versuch mit separat bereitgestellten Kunststoffsammeltüten. Die Abholung der gefüllten und Lieferung der neuen Sammelbeutel erfolgte wöchentlich. Die durchschnittlichen Anteile und das Aufkommen der Kunststofffraktion zeigt Tabelle 2.3.

1988 Berlin: Die Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt e.V plant in Zusammenarbeit mit den Berliner Stadtreinigungsbetrieben (BSR) für 1988 einen halbjährigen Großversuch zur getrennten Sammlung und Wiederverwertung von Kunststoffen. Die Besonderheit des Versuchs liegt in der Beschränkung auf drei Arten von Verpackungen:

- Weichspüler-/Flüssigwaschmittel-Flaschen aus PE,
- Farbeimer aus PE,
- Getränkeflaschen aus PET.

Die Erfassung dieser Kunststoffe erfolgt in zwölf über das Berliner Stadtgebiet verteilten Recyclinghöfe der BSR. Bei der Annahme der Abfälle wird durch das Fachpersonal eine Trennung in PE und PET durchgeführt.

Kunststofffraktion	Anteile in [%]			Aufkommen [kg/E•a]
	Mittel	min.	max.	
Folien	36,0	5,0	52,3	0,784
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

Tabelle 2.3
Anteile und Aufkommen der
Kunststofffraktion in Radolfzell-
Böhringen [83]

Der Vorteil dieser Einengung der Kunststofffraktion liegt in der größeren Sortenreinheit ohne maschinellen Aufwand sowie in dem hohen Stückgewicht, das bei PE zwischen 60 und 900 g und bei PET zwischen 30 und 50 g beträgt [30,31].

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.

2.3.2 Sammlungen in anderen Ländern

Die nachfolgenden Angaben wurden [83] entnommen.

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 Müllabfuhr bei 80.000 Einwohnern keine Angaben über die Verwertung.

Seit 1970 Frankreich: Separate Erfassung von Kunststoffflaschen. Dort wird ein Viertel der Getränke in PVC-Flaschen abgefüllt (20.000 Mg/a, entsprechend 20 % des gesamten PVC-Verbrauchs Frankreichs). Zusammenschluß der PVC-Hersteller zur Verwertungsgemeinschaft (GREPP) mit dem Ziel, inklusive den PVC-Getränkeflaschen insgesamt langfristig 40.000 Mg/a zurückzuführen; seit 1978 separate Flaschenerfassung in 10 Städten mit insgesamt 700.000 Einwohnern. Eine Rückführquote von 37 % wird erreicht. Als Sekundärprodukte werden Kabelkanal- und Drainagerohre hergestellt.

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).

1974/75 Wien, Österreich: Einjähriger Versuch zur getrennten Wertstoffsammlung; die Wertstoffsäcke von 420 Haushalten wurden wöchentlich per VW-Bus entsorgt; Erfassungsgrad ca. 30 %; beste Sammelergebnisse bei jungen Einwohnern und gehobener Sozialschicht.

3 Grundlagen und Probleme

3.1 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 als Produkt herrühren,
- Nichtkunststoffe, die als Fehlstoffe eingetragen werden, z.B. Papier.

Die äußerliche Verschmutzung durch fremde Müllbestandteile ist bei der konventionellen Ein-Gefäß-Sammlung am höchsten. Der Verschmutzungsgrad liegt nach Untersuchungen bei ca. 5 % [71]. Durch eine Trennung der Müllbestandteile vor der Sammlung, können diese Verschmutzungen weitgehend vermieden werden.

Die von der Produkt-Nutzung 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 3.1 zeigt mittlere Verschmutzungsgrade für drei typische Haushaltsverpackungen. Diese liegen zwischen 28 und 60 % des Verpackungsgewichts. Die aufgeführten Inhaltsstoffe sind allerdings stark wasserhaltig. Nach einer ohnehin notwendigen Trocknung reduziert sich die verbleibende Verunreinigung entsprechend auf ca. 5 - 15 %. Hinzurechnen sind eventuelle Produktaufkleber oder Deckelfolien aus Aluminium.

Der Anteil der Fehlstoffe 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 Einwurfoffnungen 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 [43].

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, el. Leitfähigkeit).

3.2 Einfluß von Kunststoffmischungen auf die Wiederverwertung

Mischungen von verschiedenen Kunststoffarten verschlechtern die Qualität der daraus hergestellten Produkte zum Teil erheblich. Die in Tabelle 3.2 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 3.3). 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. Abschnitt 4.2).

Müssen Produkte aus Sekundärkunststoffen nur geringen Ansprüchen genügen, so können auch Mischungen der drei Hauptfraktionen (PE/PP, PS, PVC) verarbeitet 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 Kunststoffolien bereits seit einigen Jahren Stand

Parameter	Einheit	Quarkbecher	Joghurtbecher	Spülmittel
Füllinhalt	g	500	150	500
Restinhalt	g	4,5	5	18
Restanteil	Gew.-%	0,9	3,3	3,3
Leergewicht	g	9	3,3	47
Verschmutzung	Gew.-%	33	60	28

Tabelle 3.1
Verschmutzung durch Restinhalte ausgewählter Haushaltsverpackungen [71]

Tabelle 3.2
Unverträglichkeit verschiedener Kunststoffarten
[71]

(1 $\hat{=}$ sehr gute Mischbarkeit, 6 $\hat{=}$ Unverträglichkeit)

	Polystyrol	Styrol-Acrylnitril-Copolymer	ABS	Polyamid	Polycarbonat	Polymethylmethacrylat	Polyvinylchlorid	Polypropylen	Polyethylen
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	-	
Polyethylen	6	6	6	6	6	6	6	6	-

der Technik und wird seit kurzem auch für Hohlkörper (Bild 3.1) angewandt [66]. 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 Koextrusion, 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.

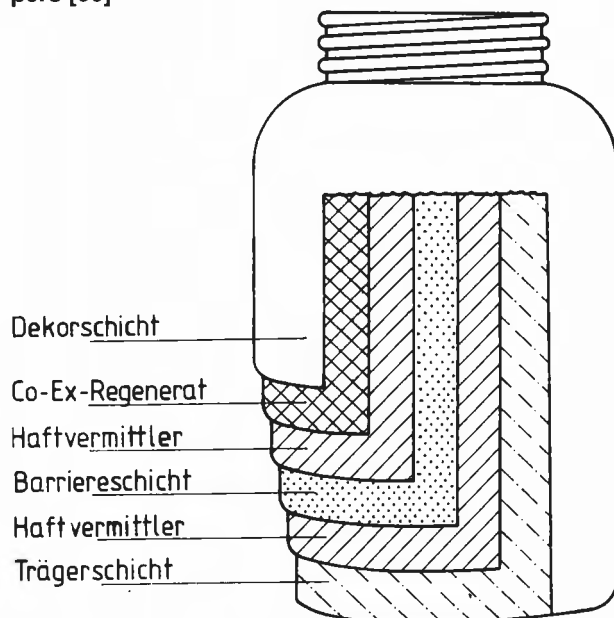
3.3 Additive in Kunststoffen und deren Auswirkung auf das Recycling

Die bei der Herstellung von Kunststoffserzeugnissen vielfach verwendeten Additive werden nach den entsprechenden Einsatzgebieten in Prozeß- und Funktionsadditive unterschieden. Während Hilfsstoffe zur

Tabelle 3.3
Schmelzindices von verschiedenen LDPE-Folientypen [71]

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 3.1
Struktur eines 6-schichtig koextrudierten Hohlkörpers [66]



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

Additiv	Umweltrelevante Inhaltsstoffe
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 ₂ O ₃ -Synergist
Flammschutzmittel	bromidhaltige Verbindungen
	Halogen-haltig

Tabelle 3.4
Umweltrelevante Inhaltsstoffe aus-
gewählter Additive

der Zusammensetzung sowohl auf das verwendete Polymer als auch auf die Gebrauchsanforderungen abgestimmt sein müssen, eingesetzt.

Als modifizierende Additive kommen 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 Erweichungstemperaturen 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. der aufgrund der Hydrophobie fehlenden Feuchtigkeitshaut an der Oberfläche zur elektrostatischen Aufladung, wodurch Staub und Schmutzpartikel angezogen werden. Zur Vermeidung werden Antistatika eingesetzt oder nachträglich auf der Oberfläche aufgebracht (vgl. Abschn. 5.3.3).

- Flammschutzmittel 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. Nachfolgende Tabelle 3.4 gibt einen Überblick, über umweltrelevante Inhaltsstoffe ausgewählter Additive.

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 recyceltem Kunststoff lassen sich somit nicht mit gleicher Genauigkeit einstellen wie bei Verwendung von Primärmaterial.

4 Maßnahmen zur Optimierung

4.1 Veränderung der Produktgestaltung

Überlegungen zur Verwertung von Kunststoffabfällen setzen zumeist erst bei den vorliegenden Reststoffen an. Dieses Verhalten hat zur Folge, daß nur ein geringer Teil der Kunststoffe recycelt bzw. verwertet werden kann und dies oft nur durch technisch aufwendige Verfahren, wie z.B. Pyrolyse. Ein anderer Weg wäre, bereits bei der Konzeption und Konstruktion eines Erzeugnisses Recyclinganforderungen (Kennzeichnung, Verbindungstechnik oder Homogenität) zu berücksichtigen. Dadurch könnte eine größere Menge an Kunststoffen wirtschaftlich zu Regranulat wieder aufbereitet werden.

Zur Realisierung dieses Ziels bieten sich verschiedene Ansatzpunkte an:

- Wahl der Kunststoffart und des Verarbeitungsverfahrens,
- Wahl von Mischkonstruktionen statt Verstärkungen.

Bei der Auswahl der Kunststoffart sollte immer geprüft werden, ob für den Anwendungszweck Thermoplaste oder physikalisch vernetzte Elastomere - weder geschäumt noch verstärkt und mit homogenem Aufbau - ausreichen, so daß der Einsatz von Duroplasten, verstärkten, geschäumten oder mehrschichtigen Thermoplasten auf ein Minimum reduziert werden kann. der Zusammensetzung sowohl auf das verwendete Polymer als auch auf die Gebrauchsanforderungen abgestimmt sein müssen, eingesetzt.

Erweiterte Einsatzmöglichkeiten für homogene Thermoplaste sind künftig durch Methoden der Eigenverstärkung zu erwarten. Dazu werden Polymere mit Flüssigkristallen verwendet oder Molekülorientierungen gezielt eingesetzt, wobei der makromolekulare Aufbau weiterhin homogen bleibt. Der Weiterentwicklung dieser Verfahren widmen sich einzelne Hochschulinstitute (TU Berlin, Kunststofftechnikum [44]).

Ein gezielter Einsatz von Mischkonstruktionen, bestehend aus Kunststoffen und Nicht-Kunststoffen, erhöht

die Recyclingfähigkeit dieser Produkte gegenüber heute üblichen faserverstärkten Erzeugnissen. Es sollte im Einzelfall geprüft werden, ob ein stark beanspruchtes Werkstück statt aus verstärktem Kunststoff aus einem hochfesten anderen Werkstoff in Kombination mit einem Thermoplasten hergestellt werden kann. Der Thermoplast wird dabei so eingesetzt, daß er weitgehend frei von Belastungen ist. Dies erfordert i.d.R. Änderungen in der Konstruktion und der Prüfung des Produktes. Bild 4.1 zeigt verschiedene Konstruktionsalternativen für einen Leichtbauträger. Der Preis, die Belastungsfähigkeit, das Belastungs-/Gewichtsverhältnis sowie der Recyclingaufwand sprechen für den Stahl-Kunststoff-Träger in Mischkonstruktion.

4.2 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.

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

Sandwichträger mit Deckschichten aus glasfaserverstärktem Duroplast

Träger aus homogenem Thermoplast

Kunststoff-Stahl-Mischkonstruktion aus homogenem Thermoplast und geballtem Stahlblech

Stahl-Vierkantrohr

	sehr groß	groß	sehr klein	groß	klein	mittel
Recyclingaufwand	sehr groß	groß	sehr klein	groß	klein	mittel
Gewicht [kg/m]	4	5	5	4,5	7,9	13,5
Biegesteifigkeit [N·mm ² · 10 ¹¹]	2	6	0,2	2,6	9,4	11
DM / kg	5	6	2,40	11	2,60	2,70

Bild 4.1
Verschiedene Konstruktionen für einen Leichtbauträger [44]

stems (vgl. Abschn. 2.2.2) - ähnlich dem Altglas - seine Kunststoffe in unterschiedliche Behälter einwerfen. Die getrennte Verwertung könnte ohne große Probleme erfolgen.

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 PVCs - mit entsprechenden Absatzauswirkungen. Auch Überlegungen einer speziellen, für den Verbraucher nicht lesbaren Codierung wurden wieder fallen gelassen.

In welchen Maße derartige Kennzeichnungen durch den Verbraucher akzeptiert und befolgt werden, ist Bestandteil des Berliner Großversuchs (vgl. Abschn. 2.3.1).

4.3 Qualitätskriterien von Sekundärkunststoffen

4.3.1 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.

Der Grad der Vorschädigung und der Verschmutzung wird weitgehend von der Herkunft der Recyclingmaterialien bestimmt.

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 erneut 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 unerlässlich, 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 den engen Anwendungsbereich beschränken.

4.3.2 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 Eignungsprüfung 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 [52] 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 4.2), konnte beim Innendruckversuch eine deutliche

Bild 4.2
Kurzzeit-Zugversuch an Rohren aus mehrfach extrudiertem PE [52]

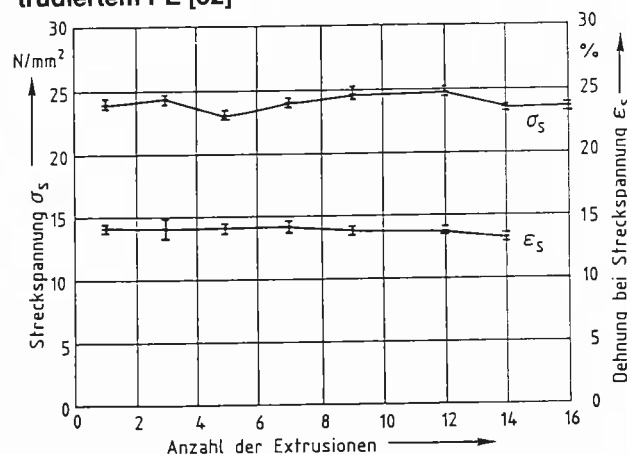
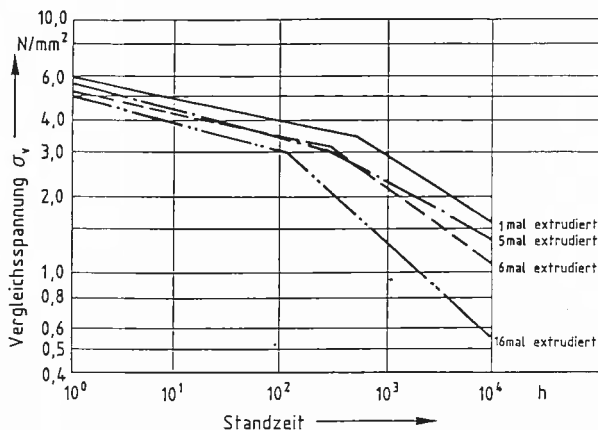


Bild 4.3
Zeitstand-Innendruckversuch an Rohren aus mehrfach extrudiertem PE [52]



che Abnahme der Standzeit mit zunehmender Extrusionshäufigkeit festgestellt werden (Bild 4.3). 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 Molekulmassenverteilung 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.

4.3.3 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 Wege Aussagen über Ausgangsmaterial, Vorbehandlung und Pigmentierung möglich [17].

4.3.4 Qualitätsstandards für Sekundärstoffe

Qualitätsstandards werden überall dort geschaffen, wo an Produkte und Materialien verschiedene 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) geschaffen, 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 4.1 und 4.2 wieder. Maßgeblich für die Einordnung in eine der vier Qualitätsstufen sind Dichte (density) und Biegeelastizität (bending elasticity).

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 ±3°
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 system.

(2) The unit and figures shown in { } are based on the international unit system (SI).

Tabelle 4.1
Japanische Qualitätskriterien für Markierungsstangen aus Sekundärkunststoffen (JIS K 6932)
(Angaben in { } entsprechen den SI-Einheiten)

4.4 Entwicklung und Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen

Die Vorteile biologisch abbaubarer Kunststoffe liegen darin, daß die Entsorgungswege Deponierung und Kompostierung wesentlich entlastet würden. Versuche zur Entwicklung von biologisch abbaubaren Thermoplasten laufen bereits seit einigen Jahrzehnten. Diese Versuche erfolgten in der Vergangenheit zunächst unter dem Aspekt als Einsatzstoff nicht Erdöl, sondern ein biologisch produziertes Ausgangsmaterial zu verarbeiten, um natürliche Ressourcen zu schonen.

Die Fa. ICI berichtete Ende 1986 von einem Verfahren, mit dem biologisch abbaubare Thermoplaste industriell hergestellt werden können [85], die aus den aliphatischen Polyestern Polyhydroxybutyrat (PHB) und Polyhydroxyvalerat (PHV) bestehen (Bild 4.4).

Das Material wird von einer bestimmten Bakterienart produziert und in deren Zellen eingelagert. Dies kann in großen Reaktoren auf einer Vielzahl von Nährsubstraten erfolgen. Danach werden die übrigen Zellbestandteile entfernt. Das Polymer ist nach herkömmlichen Verfahren mit vorhandenen Anlagen verarbeitungsfähig.

Durch die Einstellung des Mischungsverhältnisses zwischen PHB und PHV lassen sich die Eigenschaften des Thermoplasten variieren, so daß diese entweder einem sehr harten Material (vergleichbar PVC ohne Weichmacher) oder einem zähen Produkt (ähnlich PE) entsprechen.

Nach Angaben der Fa. ICI ist eine mehrfache Wiederverwertung des Materials innerhalb der industriellen Verarbeitung möglich. Der Abbau des Produktes findet unter anaeroben Bedingungen statt, der in Deponien oder Kompostwerken erfolgen kann.

Es ist jedoch anzumerken, daß dem Verfahren die Praxisreife bislang fehlt. Die Fa. ICI betreibt seit Anfang 1987 eine Betriebsanlage mit einem Durchsatz von 3 Mg/Wo. Bis Ende 87 sollte die Kapazität auf 20 Mg/Wo ausgedehnt werden. Das Produkt soll sich bei einer Anlagenkapazität von 1.000 Mg/a für 27 bis 35 DM/kg und bei 10.000 Mg/a für 5 bis 7 DM/kg herstellen lassen.

Für Versuchszwecke (u.a. Produktverträglichkeit, Langzeitdiffusion) werden in Deutschland seit geraumer Zeit 200 ml-Flaschen mit Schraubdeckel aus Biopol hergestellt (Bild 4.5).

4.5 Beschränkung und Ersatz von Einwegsystemen

Die Rücknahmeverpflichtung durch den Händler oder Hersteller für Produkte nach deren Gebrauch wird seit

einiger Zeit im Rahmen einer geordneten Abfallentsorgung diskutiert. Gesetzlich verankert ist dies bislang nur für Altöl im Abfallgesetz von 1986 mit dem Ziel, Boden- und Grundwasserverunreinigungen durch eine falsche Entsorgung zu verhindern und das Altöl durch Aufbereitung einer Mehrfachnutzung zu unterwerfen.

Zur Diskussion stehen derzeit Maßnahmen zur Verhinderung größerer Abfallmengen durch den Gebrauch der 1,5 l-Einweg-Flasche aus PET in Deutschland. Auf Drängen des Bundesumweltministeriums (BMU) verzichtete die Fa. Aldi auf den weiteren Verkauf von PET-Flaschen [62]. Darüberhinaus wurden vom Verband der Deutschen Erfrischungsgetränke-Industrie die Einführung von Pfand- und Rücknahmesystemen zugesagt. Eine PET-Mehrwegflasche wurde jedoch erst für einen späteren Zeitpunkt in Aussicht gestellt.

Die Fa. Coca Cola ist seit Anfang 1988 dabei, die PET-Flasche bundesweit einzuführen. Fester Bestandteil des Marketings ist ein Recycling-Konzept, das nicht auf einem Pfand-System, sondern auf einem freiwilligen Bringsystem (s. Abschn. 2.2.2) beruht, das der Wertstoffsammlung ähnlich den vorhandenen für Glas und Papier vergleichbar ist [55]. Die Aufklärung der Verbraucher erfolgt über Handzettel, Zeitungsanzeigen und ein Beratungstelefon. Für Sammlung und Transport der Flaschen wurde die PET-Recycling Deutschland GmbH gegründet. Die Aufbereitung ist in den Niederlanden geplant. Der Verarbeiter zahlt 1.000 DM/Mg, was

Bild 4.5
Flasche und Deckel aus Biopol



Bild 4.4
Biopol-Copolymere [42]

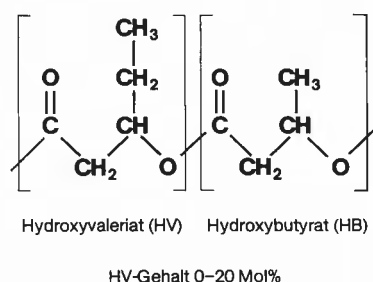


Tabelle 4.2

Japanische Qualitätskriterien für Stäbe, Stangen und Platten aus Sekundärstoffen (JIS K 6931)
(Angaben in { } entsprechen den SI-Einheiten)

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{176}		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							
Handness (reference)			H _R R	—		—		(More than 30)		(More than 60)	

etwa 0,06 DM/Flasche entspricht. Bei entsprechender Schüttdichte ergibt sich daraus ein Erlös von 60 DM/m³ für das Sammelunternehmen.

Im April 1988 hat das BMU einen Entwurf für eine Rechtsverordnung vorgelegt, mit der ein Pfand von 0,50 DM/Flasche und eine Verwertung der zurückgenommenen PET-Flaschen als Verpackungsmaterial für Erfrischungsgetränke vorgeschrieben werden soll [64]. Nicht verordnet werden soll jedoch die Wiederbefüllung der PET-Flaschen.

Ein anderes Beispiel gibt es auf dem Bausektor. Kunststoffe werden in erheblichem Umfang in der Bauindustrie als Rohre, Fensterprofile etc. verwandt. Die Produkte werden weit überwiegend aus Hart-PVC hergestellt. 1984 lag der Anteil im Bausektor bei 25 % des Kunststoffverbrauchs (vgl. Abschn. 1.3).

Die Fa. Rehau hat sich als Verarbeiter von Kunststoffen für den Baubereich bereit erklärt, PVC-Abfälle aus diesem Sektor zu sammeln und einer Wiederverwertung zuzuführen. Verstanden wird darunter ein stoffliches Recycling in eigenen Produkten bzw. bei spezialisierten Recycling-Betrieben oder eine energetische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen, die mit Rauchgaswäschen ausgestattet sind [68].

Ausgangspunkt für das Unternehmen war ein Beschluß des Münchener Stadtrates - ähnliche Entscheidungen andernorts sind bekannt -, Hart-PVC für Fenster und

Rohre nur noch dort zuzulassen, wo alternative Werkstoffe nicht zur Verfügung stehen.

4.6 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 unlöstes Problem.

In einem Forschungsprogramm wurde durch die Fa. H. Baumgarten, Neunkirchen ein Verwertungsverfahren entwickelt, das auf einer Feinstvermahlung mit anschließender Verwendung als Füllstoff beruht [65].

Ausgehärtete Duroplaste in Form von Angüssen, Verteilern und Ausschußteilen werden mit einer Schneidmühle vorzerkleinert und anschließend mit einer Hammermühle auf eine maximale Korngröße 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,
- verminderte Abfallentsorgung,
- Verkürzung der Zykluszeit.

5 Technische Grundlagen und Verfahren

Die Verwertung von Kunststoffabfällen kann prinzipiell über den Weg einer mechanischen, chemischen oder thermischen Behandlung erfolgen. Während bei der mechanischen 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 5.1).

Bei der biologischen Umsetzung wird die in biologisch gewonnenen Kunststoffen gebundene Energie durch einen bakteriellen Abbau zu CO_2 und H_2O freigesetzt, wobei eine mineralische Substanz als Reststoff bestehen bleibt. Im Gegensatz zu der mechanischen, chemischen und thermischen Behandlung handelt es sich bei der biologischen Umsetzung um keine stoffliche und energetische Verwertung, sondern um eine umweltfreundliche Beseitigung spezieller Kunststoffe.

Kunststoffe fallen sowohl in der kunststofferzeugenden 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.

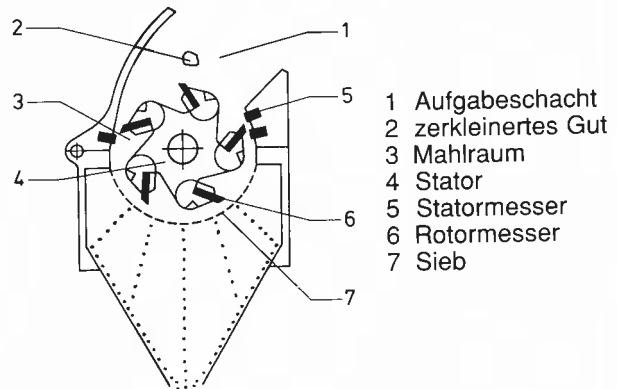
Ein erheblicher Teil, insbesondere der vermischten Abfallkunststoffe, muß daher noch gemeinsam mit dem übrigen Hausmüll deponiert oder verbrannt werden.

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.

5.1 Zerkleinern

Die Zerkleinerung hat innerhalb der Kunststoffaufbereitung eine besondere Bedeutung. Im Rahmen des Forschungsprogramms "Wiederverwertung von Kunststoff-

Bild 5.2
Schematischer Aufbau einer Schneidmühle [50]



abfällen" des Verbandes Kunststofferzeugende Industrie (VKE) wurden umfangreiche Untersuchungen zur Zerkleinerung von Kunststoffen aus Hausmüll durchgeführt [50].

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

Zur Erzeugung feinkörniger Produkte ($< 2 - 3 \text{ mm}$) werden im allgemeinen schnelllaufende Prallmühlen eingesetzt; für die Zerkleinerung zähelastischer Kunststoffe haben sich insbesondere die Schneidmühlen bewährt.

Schneidmühlen können zur Zerkleinerung von nahezu allen Kunststoffsorten verwendet werden und bieten sich aus diesem Grund zur Zerkleinerung von Restkunststoffen an. Es können Kornverteilungen erzeugt werden, deren obere Korngrößen kleiner sind als ca. $1 - 2 \text{ mm}$.

Bild 5.2 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

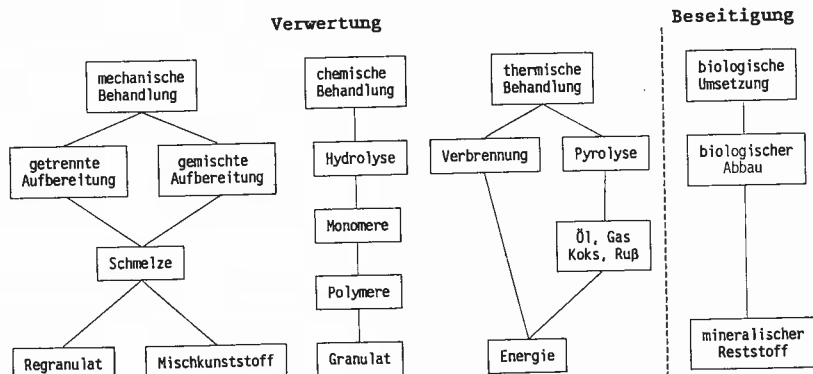
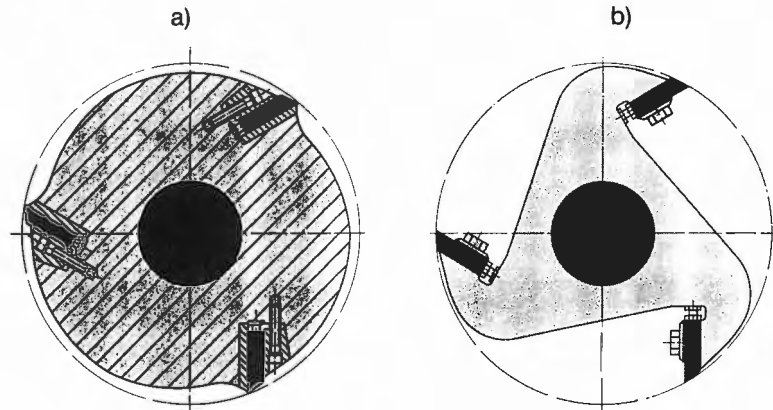


Bild 5.1
Systematik der Behandlungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen

Bild 5.3
Rotorformen bei Schneidmühlen
[50]

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



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 i. d. R. 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 einer Maschenweite von 12 mm erzielt [50]. Die mittlere Korngröße lag bei diesen Versuchen zwischen 4 und 8 mm.

Für die Zerkleinerung von großstückigen Kunststoff-Formkörpern werden Schneidmühlen mit "geschlossenen Rotoren" bevorzugt. Die Schneidmesser sind dabei am Umfang einer Vollwalze befestigt und haben einen Vorstand zwischen 4 und 15 mm (Bild 5.3a). Offene Rotoren werden bei Materialien eingesetzt, deren Eigenschaften und Formen variieren (z.B. Folien, Schaumstoffe) (Bild 5.3b).

Um die Wirtschaftlichkeit der Zerkleinerung quantifizieren zu können, ist es notwendig, den massenbezogenen Energiebedarf und die damit verbundenen Zerkleinerungskosten zu ermitteln. Serienversuche hierzu wurden von der TU Clausthal [50] mit einer Schneidmühle durchgeführt.

Die eingesetzte Schneidmühle war mit einem offenen Rotor (Durchmesser 400 mm, Länge 630 mm) ausgerüstet.

Der massenbezogene Energiebedarf hängt von der Stoffart, der Erscheinungsform (Kompakmaterial, Folie, Schaum, Hohlkörper) und der Gestalt (zerkleinerte Folien, Rohre usw.) des Materials ab.

Die durchgeführten Versuche zeigten, 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 traten Unterschiede und Schwankungen im Energiebedarf auf. Erheblichen Einfluß hat insbesondere die Gestalt der Folien. Zerknitterte Folien wiesen einen höheren Energiebedarf auf als glatte.

Der zur Zerkleinerung von Kunststoffmischungen erforderliche Energiebedarf läßt sich durch Superposition der an reinen Komponenten ermittelten Daten berechnen.

Bei einem mittleren massenbezogenen Energiebedarf von 30 - 35 kWh/Mg liegen die Zerkleinerungskosten für definierte Kunststoffe zwischen 63,- bis 74,- DM/Mg bei einem Durchsatz von 1.000 Mg/a [50].

Gemischte Kunststoffabfälle aus Hausmüll mit einem erhöhten Anteil an metallischen Verunreinigungen sollten zur Verschleißminderung der Schneidmesser vorzerkleinert werden.

Sinnvoll erscheint bei der Zerkleinerung von Kunststoffen aus Hausmüll eine zweistufige Zerkleinerung, wobei zwischen der ersten Zerkleinerungsstufe mittels Hammermühle und der zweiten Zerkleinerungsstufe mittels Schneidmühle eine Abtrennung der Metallanteile durch Windsichtung oder Magnetscheidung erfolgt.

Eine zweistufige Zerkleinerung erzeugt bei minimalem Verschleiß das für eine Verarbeitung geeignete Produkt, verursacht aber auch die höchsten Betriebskosten. Bei Zerkleinerungsversuchen mit einer Hammermühle wurde ein mittlerer Energiebedarf von etwa 150 kWh/Mg ermittelt [50].

5.2 Klassieren

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

Dazu eignen sich prinzipiell die Aufbereitungsverfahren

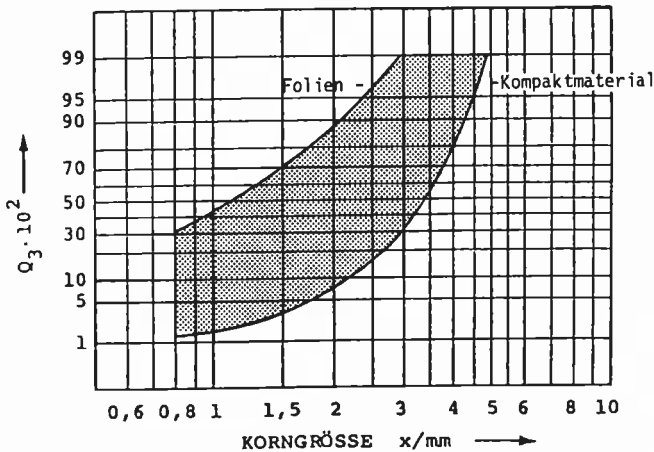
- Siebung,
- Sichtung.

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 [13,50].

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

Bild 5.4
Korngrößenbereich zerkleinerter Kunststoffe bei Verwendung eines 6 mm-Mahlraumsiebes in einer Hammerrmühle [50]



5.2.1 Sieben

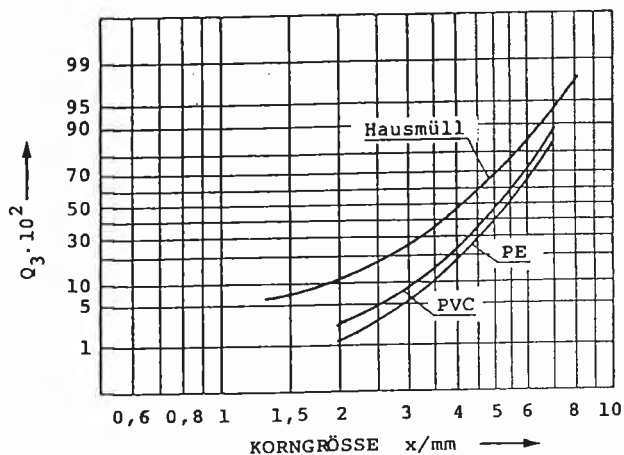
Zur Beurteilung eines Klassiererfolges mittels Siebung ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung des Inputmaterials erforderlich.

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 Hammerrmühle 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 5.4).

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 5.5).

Bild 5.5
Korngrößenverteilungen zerkleinerter Kunststoffe bei Verwendung eines 12 mm-Mahlraumsiebes in einer Hammerrmühle [50]



5.2.2 Sichten

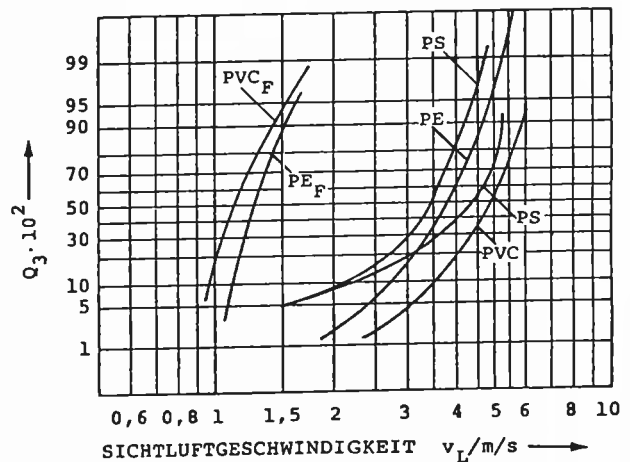
Während bei der Siebung eine Trennung des Mahlgutes ausschließlich nach der Korngröße stattfindet, erfolgt die Klassierung mittels Strömungstrennverfahren wie z.B. der Windsichtung nach der Sinkgeschwindigkeit im Luftstrom. Die Sinkgeschwindigkeit ist eine Funktion von Größe, Dichte und Form der Partikel.

Die Sinkgeschwindigkeitsverteilungen unterschiedlicher Kunststoffe in einem Zick-Zack-Windsichter sind in Bild 5.6 dargestellt.

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 Dichteeinfluß 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.

Bild 5.6
Sinkgeschwindigkeitsverteilungen ermittelt mit Labor-Zick-Zack-Windsichter MZM 40 x 40 [50]



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

Tabelle 5.1
Übersicht über Trennverfahren zur
Kunststoffsartierung [7]

Trennparameter	Trennverfahren	Korngröße	Voraussetzungen
Dichte	Trocken: Strömungsverfahren im Gasstrom	> 1 mm	enger Korn- größenbereich großer Dichte- unterschied
Dichte	Naß: Strömungsverfahren im Wasser	> 1 mm	- " -
	Schwimm-Sink- Scheidung	> 1 mm	
	Schwerflüssigkeits- zyklonierung	> 0,5 mm	Dichteunterschied 0,02 g/cm ³
optische Eigenschaften	automatische Klaubeverfahren	> 1 mm	enger Korn- größenbereich
thermische Eigenschaften	automatische Klaubeverfahren	einige mm	
elektrische Eigenschaften	Elektrohochspan- nungsscheidung	> 1 mm	enger Korn- größenbereich
Benetzbarkeit mit Wasser	Flotation	> 0,2 mm	max. Korngröße nicht bekannt

vorhergehende Windsichtung kann die Siebeladung 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 Gesamtanlagenkosten 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 Sortierergergebnissen führen.

Bei Mehrkomponentengemischen, in denen sich die Sinkgeschwindigkeitsverteilungen der beteiligten Komponenten beträchtlich unterscheiden, 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.

5.3 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 ab (Tabelle 5.1).

5.3.1 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,
- Hydrozyklon-Verfahren.

Mit Schwimm-Sink-Verfahren lassen sich aus Kunststoffmischungen Fraktionen mit Reinheiten von über 98 % herstellen, wobei jedoch eine Auftrennung der PVC-weich-Sorten nicht möglich ist. Die natürliche Hydro-

phobie 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:

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

Entsprechend diesen Differenzen wird die Dichte der Trennflüssigkeit z.B. mit CaCl₂ (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 g/cm³) 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.

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

Die Nachtrennung der Sinkfraktion in einer CaCl₂-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 erzeugt (Bild 5.7).

Der Hydrozyklon zeichnet sich gegenüber dem Schwimm-Sink-Verfahren durch einen einfacheren Auf-

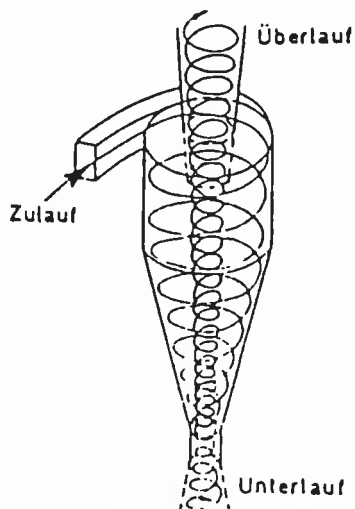
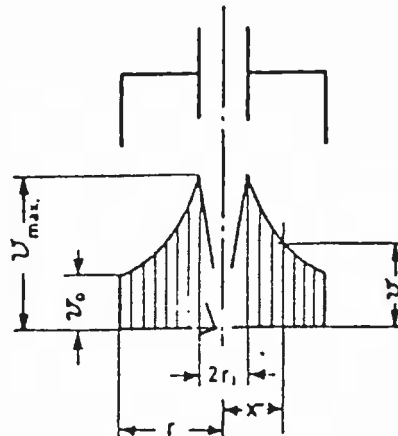


Bild 5.7
Schema eines Hydrozyklons [7]



bau - 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.

Im Rahmen der Untersuchungen des VKE wurden Versuche im Technikumsmaßstab an einem Hydrozyklon mit einer Kapazität von 1 Mg/h durchgeführt [7]. 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 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 PVC und 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 [7].

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

5.3.2 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 aufschwemmen. 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 bestehend aus PE, PS und PVC 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 [7].

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.

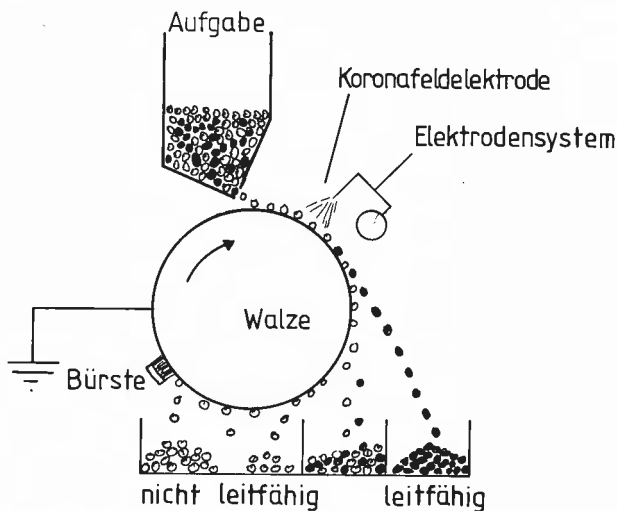
5.3.3 Elektrostatische Sortierung

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 eine 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 5.8) [7].

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 [7].

Bild 5.8
Schematische Darstellung der Trennung eines Kunststoff-Gemisches mit einem Koronawalzenscheider



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.

5.3.4 Automatische Klaubeverfahren

Die Nutzung optischer (Laserstrahl mit IR-Analyse) und thermischer (Erweichungspunkt, Wärmeleitfähigkeit) Eigenschaften zur Sortierung von Kunststoffen mittels Verfahren zur vollautomatischen Klaubung sind bisher noch nicht ausreichend untersucht worden. Bisherige Ergebnisse wurden nicht veröffentlicht [7].

5.4 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 Träger-substanz, 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.

5.4.1 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 Heiß-

abschlaggranulierung 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.

5.4.2 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 vom Polyethylen und vom 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:

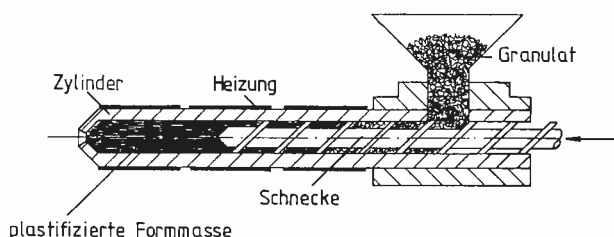
- Fördern,
- Verdichten,
- Plastifizieren,
- Homogenisieren.

Zur Verdichtung der pulver- oder granulatförmigen Kunststoffmasse wird i.d.R. ein in mehrere Zonen unterteilter Schneckenverdichter eingesetzt (Bild 5.9). Die Materialförderung des Feststoffes erfolgt im Einschneckenextruder aufgrund der Reibungskräfte zwischen Kunststoffformmasse, Zylinderwand und Schnecke. Die Förderung ist um so 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 Schneckenzyklinders 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, heraus-

Bild 5.9
Herstellung von Formteilen im Einschneckenextruder



gedrückt 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 [32,72].

5.4.3 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, Verpackung und PUR auch in der Polyesterindustrie Anwendung.

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.

5.4.4 Spritzgießen

Beim Spritzgießverfahren werden Kunststoffe als Roh-

material in Form von Granulat, als Profilstränge oder pulverförmig eingesetzt. Mit dem Verfahren können sowohl Thermoplaste, Duroplaste als auch 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 Spritzgießmaschinen wird der Kunststoff in Form von Granulat, Profilstränge 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 5.10).

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, Farbstoffe oder Pigmente, mit einem durchschnittlichen Anteil von 30 % erreicht.

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

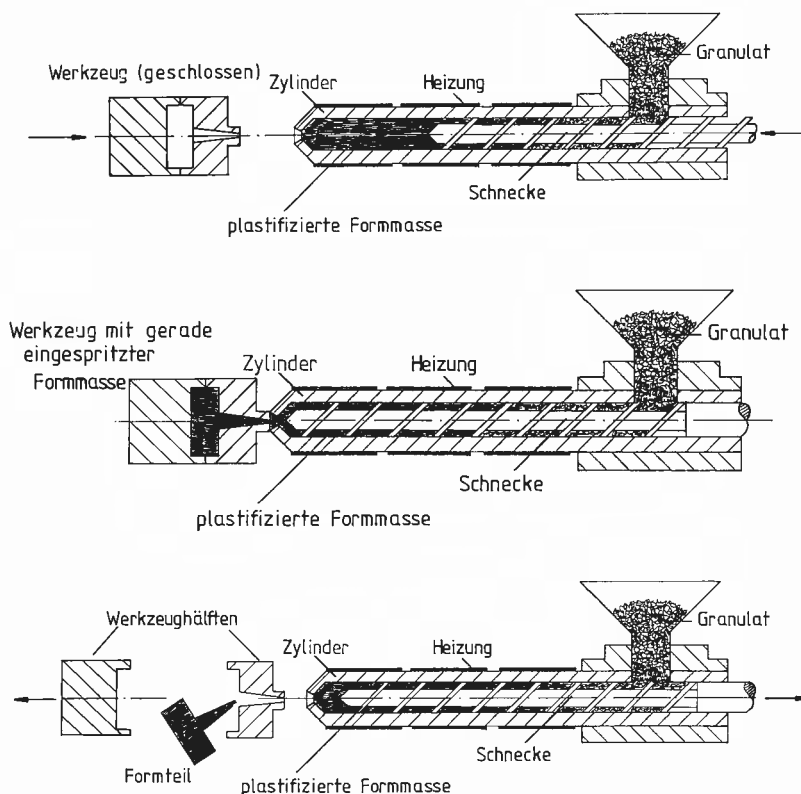


Bild 5.10
Herstellen von Formteilen mittels des Spritzgießens

Tabelle 5.2
Plastifizierungstemperaturen verschiedener Kunststoffe [20]

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

Vorteil, abfallfrei zu fertigen. Hohlkörper (z.B. Flaschen) können im Bereich von Hals und Boden nahtlos hergestellt werden. Beim Spritzblasen wird eine exakte Wanddickenverteilung des Materials erreicht [72].

Eine weitere Variante des Spritzgießverfahrens ist das Thermoplast-Schaumgußverfahren (TSG-Verfahren). Hiermit können Spritzgießteile großer Abmessungen mit geringem spezifischen Gewicht hergestellt werden. Der wesentliche Unterschied zum Spritzgießverfahren 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 Phonindustrie und im Automobilbau Einsatz [32,72].

5.4.5 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 [72].

5.4.6 Abluftbehandlung [20]

Um bei der Einschmelzung von Kunststoffen ein möglichst gleichmäßiges, homogenes Plastifikat zu erhalten, sollte die Arbeitstemperatur des Plastifikators

der Erweichungstemperatur der thermisch stabilsten Kunststoff-Fraktion entsprechen.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.2 aufgeführten 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.

5.4.6.1 Chemische Grundlagen der Abluftbehandlung

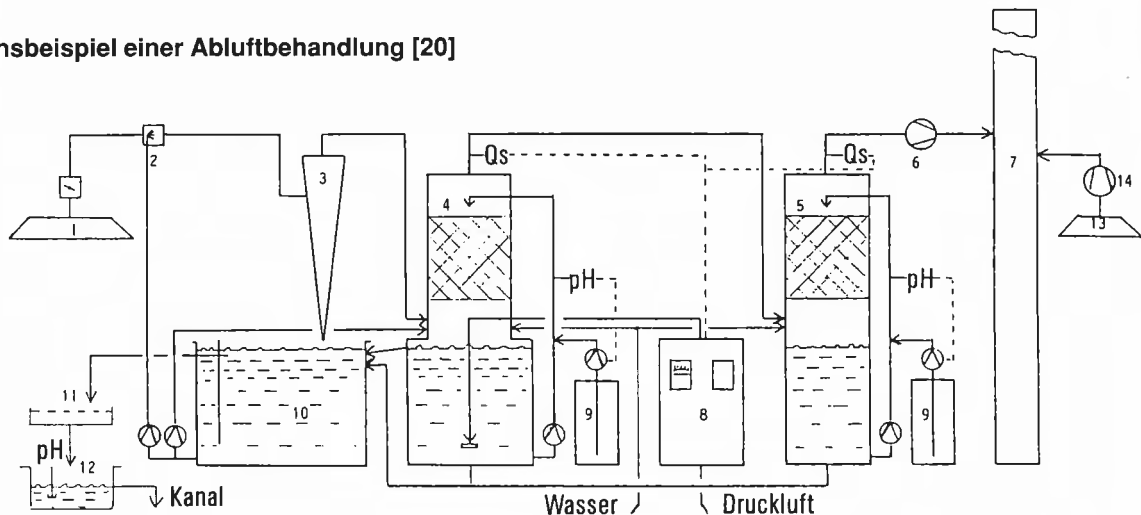
Bei den gasförmigen Crackprodukten muß davon ausgegangen werden, daß diese als Monomere oder niedermolekulare Teilpolymere vorliegen.

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 nach diesem Verfahren oxidieren, also zur Säure umsetzen.

Ist die Polymerisation jedoch schon so weit fortgeschritten, daß eine Oxidation zur Säure nicht mehr möglich

Bild 5.11
Verfahrensbeispiel einer Abluftbehandlung [20]



- | | | |
|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1 Abluftabsaugung | 6 Abluftventilator | 11 Filteranlage |
| 2 Vorwaschdüse | 7 Schornstein | 12 pH-Wert |
| 3 Zyklon | 8 Ozonerzeuger | 13 Hallenabsaugung |
| 4 Wäscher I | 9 Säure- und Laugenbehälter | 14 Abluftventilator |
| 5 Wäscher II | 10 Schlammabscheider | |

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.

Ozon zerfällt, wenn es nicht bei der chemischen Reaktionen verbraucht wird, sehr schnell zu Sauerstoff und stellt daher bei einer eventuellen Emission keine zusätzliche Umweltbelastung dar.

5.4.6.2 Verfahrensbeschreibung

Das Verfahrensschema einer beispielhaft ausgeführten Abluftreinigungsanlage besteht aus folgenden Prozessschritten (Bild 5.11):

- 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) aufgrund der Neutralisation 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 Oberflächen 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 als Waschmedium ebenfalls mit Natronlauge alkalisches und mit Ozon gesättigtes Wasser eingesetzt.

Um sowohl die für die Ozonsättigung des Waschwassers, als auch für die in der Flüssigkeitsphase ablaufenden Reaktionen notwendige Reaktionszeit sicherzustellen, ist der Wäscher mit speziellen Einbauten versehen.

Der im Wäscher 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 hydrophobe 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 Beruhigungsbecken für die erste und zweite Verfahrensstufe zu einem Becken zusammengefaßt, erfolgt durch die ständige Vermischung der Flüssigkeitsströme aus beiden Verfahrensstufen gleichzeitig die Alkalisierung des Waschmediums für die erste 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 etwa in dieser Waschstufe eingetragener 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 Washwässer gelangenden Schwermetalle als Hydroxide ausgefällt und abgeschieden werden. Diese Schwermetalle können vorwiegend in Form von Druckfarben und Pigmenten in den Kunststoffen enthalten sein und damit in den Recyclingprozeß gelangen.

Durch Kondensation und Reaktionen entstandene, nicht wassermischbare Flüssigkeiten werden an den in den Washwässern in grösserer Menge enthaltenen, aus Staubpartikeln und Reaktionsprodukten bestehenden Feststoffen absorbiert werden. 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 Waschkreisläufe.

Die Absalzung der Verfahrensstufe 3 erfolgt diskontinuierlich manuell. Der abgeführte Teil des im Kreislauf befindlichen Washwassers wird über das ständig mit alkalischem Wasser gefüllte Beruhigungsbecken abgezogen.

5.5 Pyrolyse

Die Pyrolyse (Entgasung) stellt die thermische Zersetzung von organischem Material unter Ausschluß eines Vergasungsmittels (Sauerstoff, Luft, CO_2 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 weitgehend rückstandsfrei in

- Pyrolyseruß oder -koks,
- Pyrolyseöl,
- Pyrolysegas.

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 einem Drehrohrföfen arbeiten, stehen in Salzgitter und in Bochum. Die Versuchsanlage der Mannesmann-Veba-Umwelttechnik (MVU) in Bochum lieferte neben Pyrolysegas auch wiederverkaufsfähigen 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 stützt sich maßgeblich auf die Entwicklungsarbeiten der Universität Hamburg (s. Abschn. 5.5.3).

5.5.1 Produkte und Eigenschaften

Bei der pyrolytischen Behandlung werden die Kunststoffe im Temperaturbereich zwischen 300 und 350°C in C_{25} - bis C_{40} -Aliphaten (langkettige Moleküle mit 25 - 40 Kohlenstoffatomen) gecrackt. Bei einer Temperaturerhöhung auf 700 bis 800°C in der Schmelze erfolgt eine weitere Crackung in C_2 - bis C_6 -Olefine, die bei hoher Konzentration und Temperatur unter Methan- und Wasserstoffabspaltung zu Aromaten reagieren [47].

5.5.1.1 Pyrolyseruß oder -koks

Als Feststoffe aus der Pyrolyse von Kunststoffen fallen insbesondere Ruß oder Koks, Wirbelsand (beim

Benzol-, Toluol-, Xylol-Aromaten Naphthalin + Methylnaphthaline	Gew.-% Gew.-%	60 - 70 10 - 15
Siedeverlauf:		
Siedebeginn	°C	30 - 70
Siedeende	°C	200 - 250
Dichte:	kg/m³	800 - 900
Mischoktanzahl:		80 - 100 95 - 110
Organisches Chlor:	mg/kg	0,3
Anorganisches Chlor:	mg/l	30

Tabelle 5.3
Zusammensetzung und Eigen-
schaften der leichtsiedenden Py-
rolyseölfraction [40]

Wirbelschichtverfahren) und Füllstoffe, wie z.B. Metallverbindungen an.

Der Feststoffgehalt schwankt je nach eingebrachtem Material zwischen 1 und 43 %.

Beider Pyrolyse einer Kunststoffmischung aus Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol im Verhältnis 3 : 1 : 1 (entsprechend der Zusammensetzung der Kunststoffe im Hausmüll) fallen zwischen 1 % und 3 % Ruß an; bei der Altreifenpyrolyse beträgt die Rußausbeute ca. 40 %.

5.5.1.2 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 leicht- und eine hochsiedende Fraktion getrennt werden (Tabellen 5.3 und 5.4).

In der leichtsiedenden Fraktion bildet Benzol mit 30 - 50 % die Hauptkomponente. Daneben treten Toluol, Xylol und leichtersiedende Fraktionen auf. Aus der schwersiedenden Fraktion kann mit ca. 25 % die Hauptkomponente Naphthalin gewonnen werden. Ein wesentlicher Einsatzbereich hierfür ist der Kraftstoffsektor, wobei Pyrolysebenzine zur Oktanzahlerhöhung eingesetzt werden. Die Aufbereitung der leichtsiedenden Fraktion zu chemischen Reinstoffen (Toluol, Benzol etc.) ist nicht wirtschaftlich [40,47].

5.5.1.3 Pyrolysegas

Bezogen auf die Einsatzmenge lassen sich aus Kunststoffabfällen 35 - 60 % Gas erzeugen. Das Pyrolysegas besteht hauptsächlich aus Methan, Ethan, Ethylen, Propan und weist einen Heizwert von ca. 35.000 kJ/Nm³ auf (Tabelle 5.5). Das Gas hat 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 [40,47,78].

Durch Zugabe von Calciumoxid in der Wirbelschicht kann der bei der Pyrolyse von PVC erzeugte Chlorwasserstoff gebunden werden. Die Produkte sind frei von Chlorwasserstoffgasen und Korrosionsschäden im Reaktor werden vermieden [40,47].

5.5.2 Pyrolyse verschiedener Abfallstoffe

Auf der Suche nach Anwendungsgebieten der Pyrolyse wurden Versuche mit einer Reihe verschiedener Abfallstoffe unternommen [78]. Der überwiegende Teil der nachfolgenden Ergebnisse (Abschn. 5.5.2.1 bis 5.5.2.4) wurde in der Wirbelschicht-Pyrolyse-Anlage der Universität Hamburg unter Prof. Dr. Kaminsky erarbeitet.

5.5.2.1 Sortenreine Kunststoffabfälle

An der Universität Hamburg wurde als Einsatzmaterial Polyethylen und Polypropylen verwendet. In Tabelle 5.6 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 %, Ethylen 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 [48].

Benzol, Toluol, Xylol-Aromaten Naphthalin + Methylnaphthaline Gaschromat. erfaßbare Anteile	Gew.-% Gew.-% Gew.-%	5 20 - 30 70
Extraktionsrückstand:	Gew.-%	6 - 10
Dichte:	kg/m³	1000 - 1200
Asche:	Gew.-%	10
Organisches Chlor:	mg/kg	5
Anorganisches Chlor:	mg/l	1000 - 2000

Tabelle 5.4
Zusammensetzung und Eigen-
schaften der hochsiedenden Pyro-
lysefraktion [40]

Tabelle 5.5
Beispiel einer Zusammensetzung
des Pyrolysegases [47]

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	

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 (Pyrolyseöl) erzeugen, wovon 43 % Aromaten sind.

5.5.2.2 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 der Gase unterschied sich kaum von den Gasen, die bei der Pyrolyse von Polyethylen mit Polypropylen gewonnen wurden. Den Hauptanteil bildeten bei den niedermolekularen Produkten Methan, Ethan, Ethylen und Propen, bei den flüssigen Produkten Benzol, Toluol, Styrol und Naphthalin.

Der Anteil der flüssigen Produkte liegt bei ca. 47 %, der Anteil der gasförmigen Produkte bei rund 51 % [40,47].

5.5.2.3 Verunreinigte Kunststoffe

Bei einer Versuchsreihe mit verunreinigten Kunststoffabfällen wurden in der Technikumsanlage in Hamburg Einwegspritzen, bestehend aus PP, PE, Elastomeren wie Kautschuk und/oder Perbunan sowie Nebenbestandteile, wie Cellophan, Zellstoff, Farbstoffanteile pyrolysiert.

Es ergab sich eine ähnliche Zusammensetzung der Gase 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 [40,47].

5.5.2.4 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 ganzer Autoreifen in mehreren Versuchsreihen 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 energieautark zu beheizen.

Bei der Pyrolyse von Altreifen werden etwa 15 - 20 % Pyrolysegas, 20 bis 30 % Pyrolyseöl und -entsprechend dem hohen Füllstoffanteil, wie Ruß, Zinkoxid im Reifen und Siliciumoxid - ca. 40 % Ruß bzw. Koks gebildet. Zusätzlich fallen 5 - 20 % Stahlcordeinlagen als Feststoff und Restmengen an Wasser an.

Das Pyrolyseöl setzt sich aus den aromatischen Kohlenwasserstoffen vor allem Benzol, Toluol und Naphthalin zusammen, die in verschiedene Fraktionen getrennt werden können.

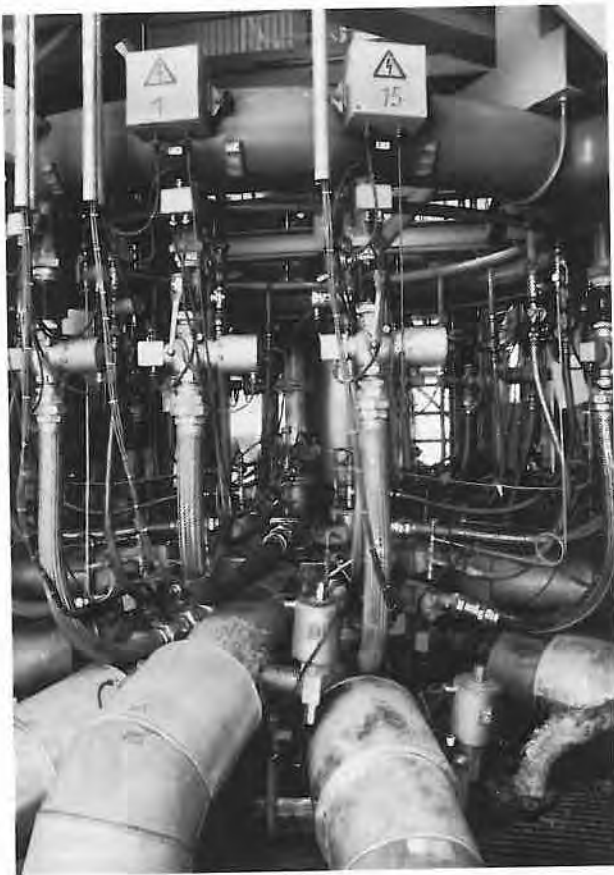
Der Schwefel aus den Reifen, der aus den Vulkanisierungsprozessen stammt und im Durchschnitt etwa 2 % des Kunststoffanteiles ausmacht, gelangt zum größten Teil gebunden an Zink und Cadmiumsulfid in den Ruß.

Zur Erzeugung eines verkaufsfähigen Produktes muß der rückgewonnene Ruß speziellen Raffinationsverfahren und einer Aktivierung zur Vergrößerung der inneren Oberfläche unterzogen werden [47,48,78].

Tabelle 5.6
Rohgasanalyse bei der Pyrolyse
von PE bei 720°C [48] in [Gew.-%]

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
Ethylen	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

Bild 5.12
Pyrolyse-Anlage Ebenhausen
Blick auf die Brenner-Ebene: 15 Mantelstrahlheizröhre mit Luft- und Brenngaszuführung [1]



5.5.3 Pyrolyseanlage ABB

Die Asea Brown Boveri AG (ABB), Mannheim, hat im September 1986 die Anlage in Ebenhausen mit dem Ziel übernommen, die Kunststoffstraße der Anlage zu sanieren und in einem einjährigen Demonstrationsbetrieb die Umweltverträglichkeit des Verfahrens und die Verfüg-

barkeit der Anlage nachzuweisen. Das Vorhaben wird durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) und den Verband Kunststoffherzeugende Industrie (VKE) gefördert und unterstützt.

Es handelt sich bei dem Verfahren um eine Mitteltemperatur-Pyrolyse. Da das Zielprodukt bei der Pyrolyse die leichtsiedende Fraktion mit hohem Benzol-, Toluol- und Xylolgehalt ist (BTX-Fraktion), liegt die Wirbelbetttemperatur bei 700 - 750°C.

Im wesentlichen besteht die Anlage aus drei Teilbereichen:

- Pyrolysereaktor mit Ein- und Austragssystem und Beheizung,
- Gasaufbereitung,
- Speichereinrichtungen (Tanks).

Der Wirbelschichtreaktor wird mit einem Hilfswirbelbett aus Quarzsand durch Mantelstrahlheizröhre indirekt beheizt (Bild 5.12). Der Kunststoffeintrag erfolgt seitlich durch 2 Schnecken in die Wirbelschicht. Der organische Anteil des Abfalles wird thermisch gecrackt und verläßt als Prozeßgas den Reaktor über Kopf. Nicht pyrolysierbare Bestandteile können z. B. über eine Austragsschnecke am tiefsten Punkt des Wirbelbettes abgezogen werden. Die heißen Pyrolysegease werden in einem Zyklon entstaubt und in 2 nachgeschalteten Kühlstufen erst auf ca. 180°C, dann auf 5°C abgekühlt. Das Pyrolysegas steht zur Prozeßbeheizung, zur Fluidisierung der Wirbelschicht und z.B. zur Stromerzeugung durch einen Gasmotor zur Verfügung (Bild 5.13).

5.5.4 Partielle Oxidation

Die Pyrolyse von Kunststoffabfällen auf Polyolefinbasis bei Temperaturen zwischen 600 und 850°C liefert ein Gemisch, das Kohlenwasserstoffe von Methan bis 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.

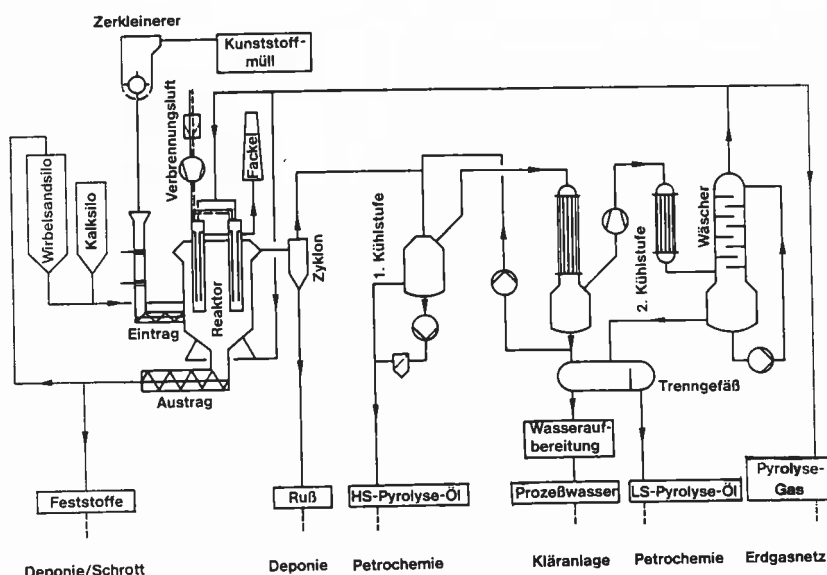


Bild 5.13
Vereinfachtes Verfahrensflißbild
der Pyrolyse-Anlage in Ebenhausen [1]

Die partielle Oxidation von Kunststoffabfällen wurde an der TH Darmstadt im Technikumsmaßstab an zwei Verfahrensvarianten untersucht [16]:

- 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 = 0,9 auf 9,5 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis = 1,5 ansteigt. Die gleiche Veränderung tritt auch bei Ethen auf, das von etwa 1 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis = 0,9 auf 5 Vol.-% bei einem C/O-Verhältnis = 1,5 ansteigt.

Die Ausbeute der Kohlenwasserstoffe ist abhängig vom Sauerstoffdurchsatz. Mit wachsendem Sauerstoffdurchsatz steigen die Volumenanteile der Kohlenwasserstoffe im Produktgas an, während die von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sinken [16].

5.5.5 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 Ethylen, 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, die Pyrolysegase in die einzelnen Gaskomponenten aufzutrennen. Die Aufbereitung der Pyrolysegase 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 [26,48].

Dies entspricht dem Aufkommen an Kunststoffabfällen (10.000 Mg/a), wenn Entfernungen bis zu 50 km zugrundegelegt werden [26,34]. Bei der Pyrolyse dieser Abfallmengen würden nur ca. 5.000 Mg/a an Gas freigesetzt, so daß eine wirtschaftliche Auftrennung in Einzelkomponenten 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 Verstärkeruß bei der Gummierstellung oder als Farbpigment in Lacken und Druckfarben eingesetzt werden [48,78].

Nach Angaben von ABB beträgt das Investitionsvolumen für eine Pyrolyseanlage mit 15.000 Mg Jahresdurchsatz 30 Mio DM. Die Netto-Beseitigungskosten liegen für Kunststoffabfälle bei ca. 200,- bis 250,- DM/Mg [56].

5.6 Hydrolyse

Ziel der Hydrolyse ist es, durch chemische Reaktionen aus Altkunststoffen die monomeren Ausgangsstoffe zu erhalten. Dies bedeutet die Rückspaltung aller durch Polykondensation oder Polyaddition hergestellten Kunststoffe wie z.B. Polyamide, Polyester, Polycarbonate, Polyharnstoffe und Polyurethane. Der hydrolytische Abbau der Kunststoffe kann mit Wasser oder mehrwertigen Alkoholen erfolgen.

Die flüssigen oder gasförmigen Hydrolyse-Produkte können nach entsprechender Aufbereitung zur Herstellung neuwertiger Kunststoffe eingesetzt werden.

5.6.1 Hydrolyse von Schaumstoffabfällen

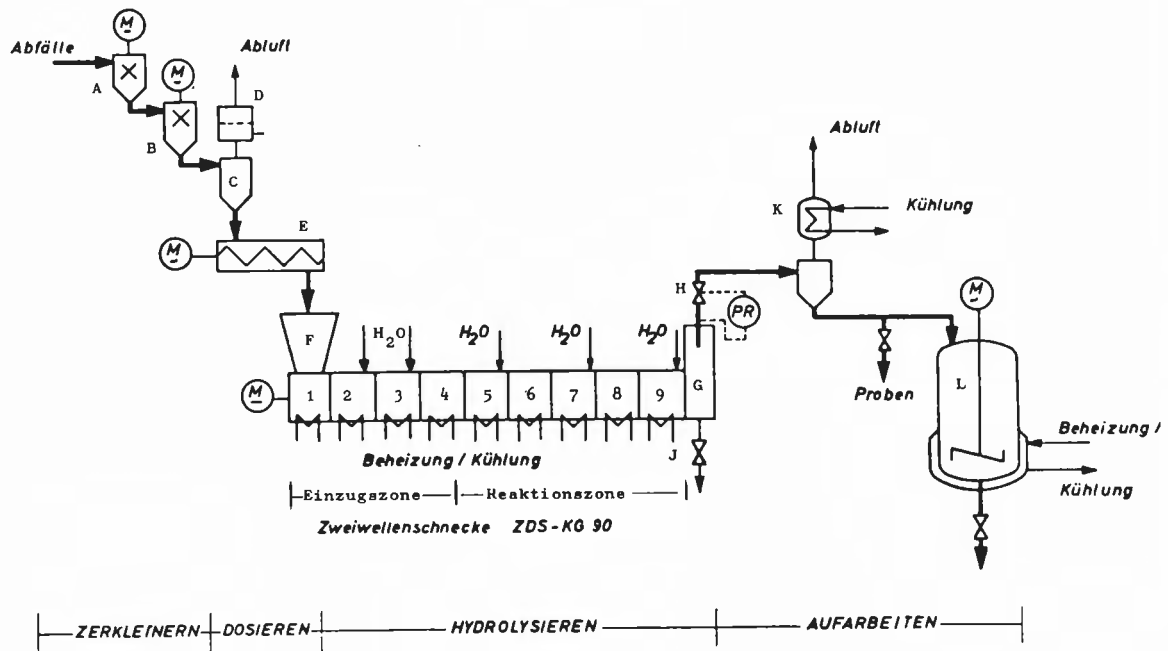
Im Bereich der Hydrolyse kommt der Wiederaufarbeitung von Polyurethanen besondere Bedeutung zu. Das als Schaumstoff verwendete Material ist vergleichsweise teuer (25 bis 30 DM/kg), sehr voluminös und verursacht hohe Transportkosten. Bei einem durchschnittlichen Raumgewicht der PUR-Weichschaumstoffe von etwa 30 kg/m³ ergibt sich ein Lagervolumen von 35 m³/Mg. Da wegen des großen Raumbedarfs ökonomische und ökologische Schwierigkeiten bei der Beseitigung von Polyurethan-Weichschaumstoff (PUR) auftreten, wurde die Hydrolyse von Kunststoffabfällen am Beispiel von PUR untersucht.

Im Rahmen des Forschungsprogrammes "Wiederverwertung von Kunststoffabfällen" [54] wurde der Einfluß verschiedener Reaktionsparameter (Druck, Temperatur, Aufheizgeschwindigkeit, Verweilzeit, Katalysator) auf die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. Umsetzungsrate und die Qualität bzw. die Wiederverwendbarkeit des Hydrolysats analysiert.

Bei Temperaturen von 200°C sind für einen quantitativen Umsatz 2 Stunden erforderlich. Temperaturerhöhungen um weitere 10 - 15°C bewirken bei gleichem Umsatz eine Verkürzung der erforderlichen Reaktionszeit um 50 %. Übersteigt die Dauer der Hydrolysereaktion 30 min nicht wesentlich, ist eine Wiederverwertung des zurückgewonnenen Polyethers möglich. Die Qualität des Hydrolysats ist damit wesentlich stärker von der Dauer als der Höhe der Temperatur bei kurzfristiger Einwirkung abhängig.

Mit Hilfe eines Zweiwellextruders der Fa. Werner & Pfleiderer, in dem der sich bei Reaktionstemperatur (200 - 230°C) einstellende Wasserdampfdruck (15 bis

Bild 5.14
Verfahrensfliessbild einer Kunststoff-Hydrolyseanlage [54]



30 bar) als ständiger Betriebsdruck aufrechterhalten wird, konnte ein kontinuierlich arbeitendes Hydrolyse-Verfahren entwickelt werden (Bild 5.14).

Die PUR-Schaumstoffabfälle werden zunächst zu Flocken oder Pulver zerkleinert und durch eine Dosier-Schnecke kontinuierlich in die Hydrolyseschnecke gefördert, die für Arbeitsdrücke bis zu 100 bar bei Temperaturen bis zu 300°C ausgelegt ist.

In einer Komprimierzone wird der Kunststoff zusammengepreßt und entlüftet. Die Verdichtung wird durch eine stufenweise abnehmende Steigung des Fördergewindes im Schneckengehäuse erreicht, das sich in drei Einzugsgehäusen und Reaktionszonen unterteilt. Ein am Ende des 3. Gehäuses befindliches gegenläufig förderndes Linksgewinde ermöglicht die Abdichtung des Hydrolysebereiches gegenüber dem Einzugsbereich und damit die Aufrechterhaltung des notwendigen Arbeitsdruckes.

Das für die Hydrolyse erforderliche Wasser wird durch Dosierpumpen in die Schnecke eingespeist, in der es durch Druck und Temperatur verdampft. Um 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 min.

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.

5.6.2 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 5.15).

Vor der Wiederverwertung muß das Amin in Isocyanat überführt werden. Da der Polyether-Anteil sich durch die

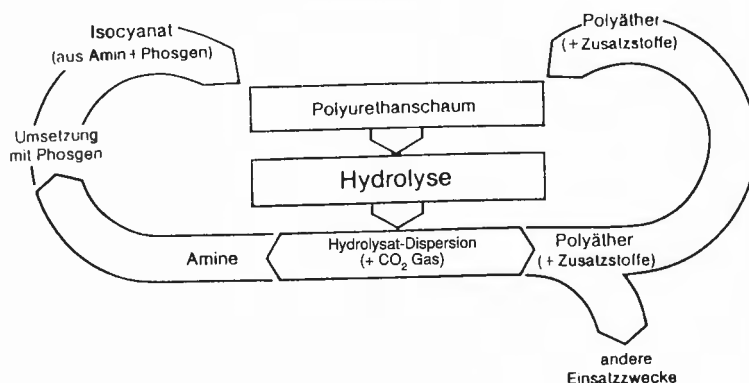


Bild 5.15
Schematische Darstellung des Recycling-Prozesses für PUR-Schaum [54]

Hydrolysebedingungen nicht verändert, kann das 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 grobkristallinen, 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 einen Temperaturbereich von etwa 70 - 90°C erfolgt und das Rohhydrolysat mit Toluol auf etwa 50 % verdünnt wird.

Die am Beispiel der Polyurethan-Weichschaumstoffe erarbeitete Technik kann auch auf andere hydrolysiertbare 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 [54].

Ein großtechnisches Verfahren wird derzeit mit Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, dem Verband der Automobilindustrie und der Kunststoffherstellenden Industrie bei der Fa. Ford in Köln entwickelt. Bei Ford könnten täglich 1,5 Mg anfallende PUR-Abfälle dem Recycling zugeführt werden [23].

5.7 Aufbereitungsverfahren

Für den Bereich der technischen Kunststoff-Teile mit geringen Anforderungen an Farbe bzw. physikalischen

Bild 5.16
Preisentwicklung von PE, PP und PVC (Neuware)

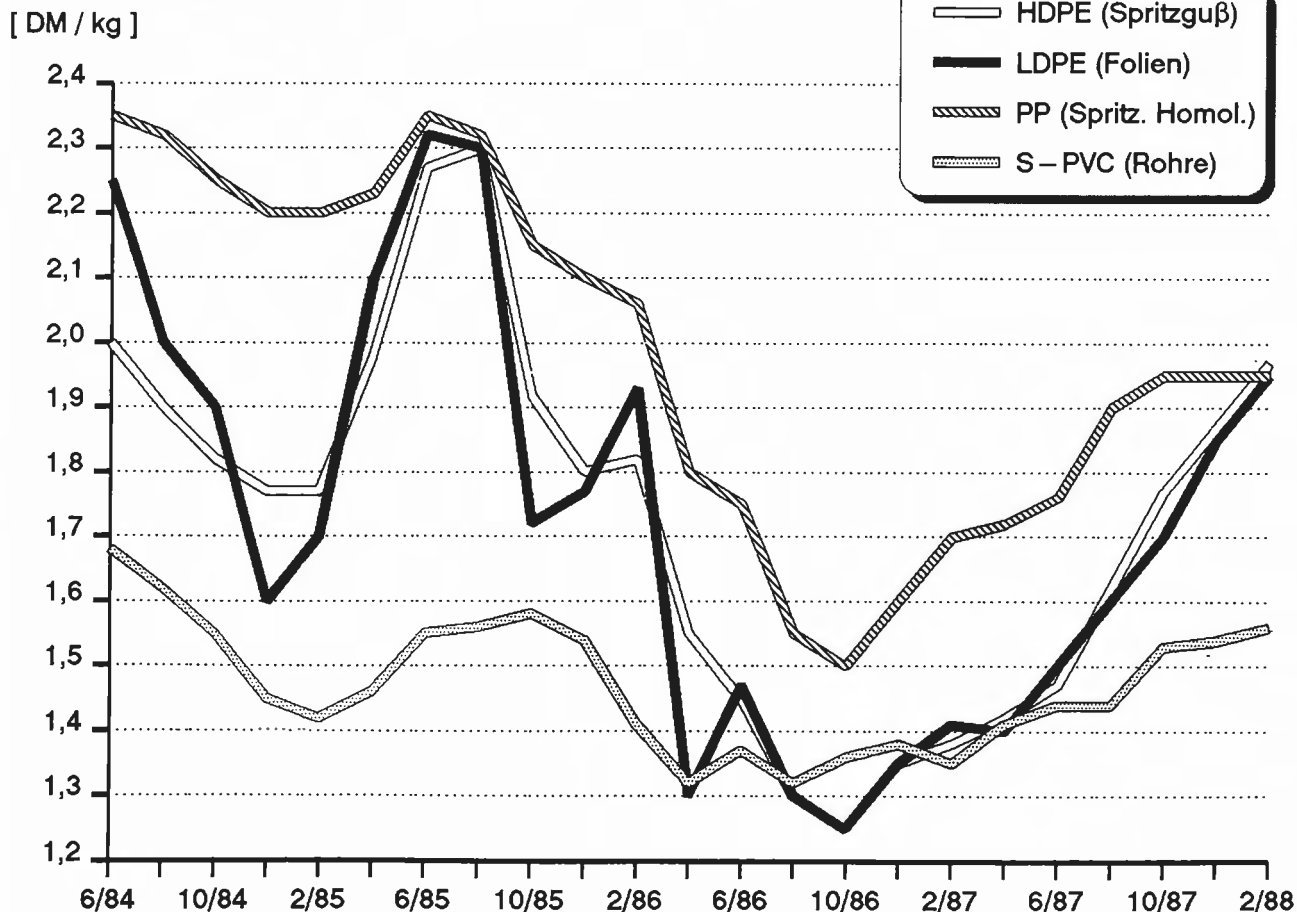
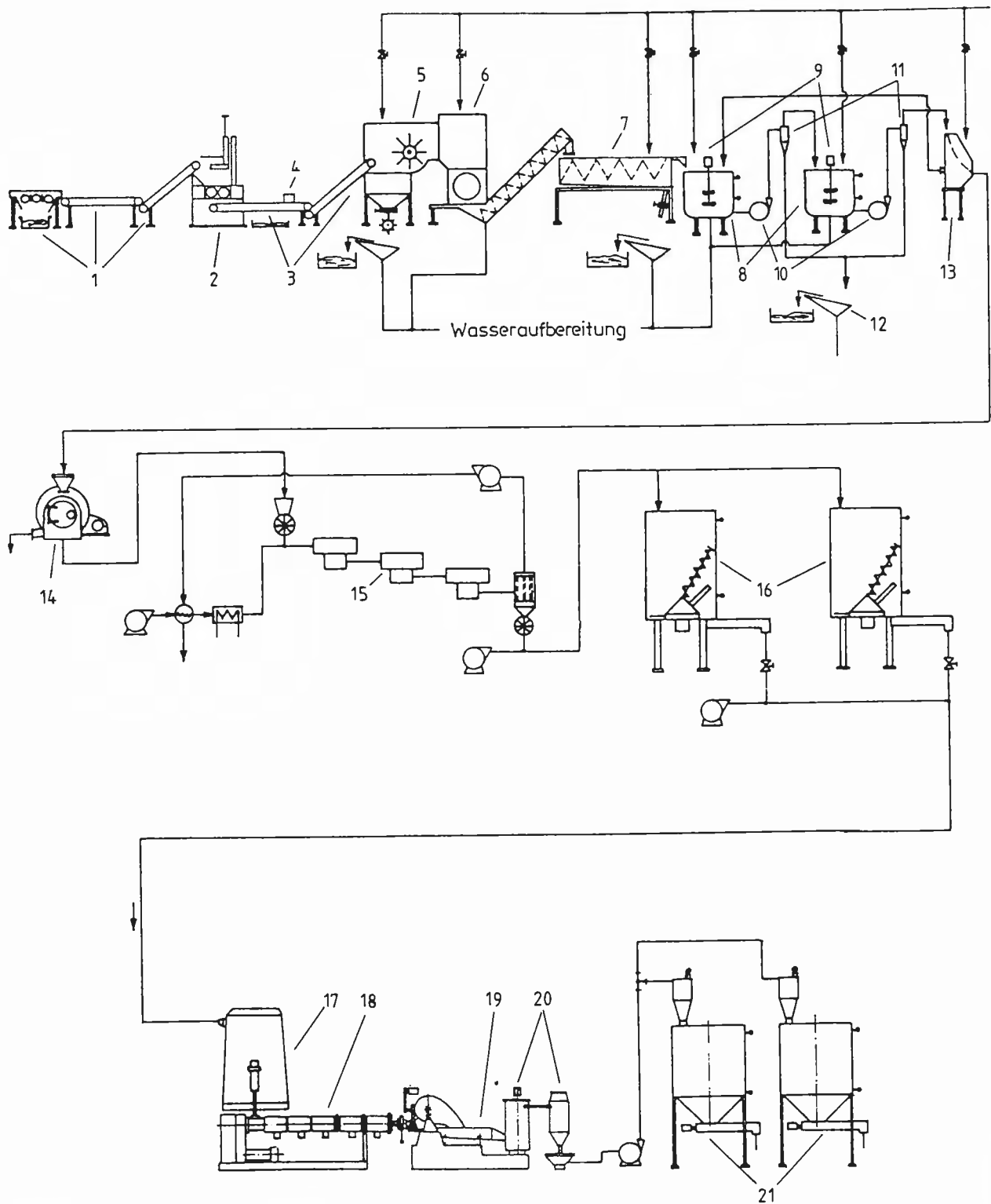


Bild 5.17

Aufbereitungsverfahren zur Gewinnung von PE-Granulat, System AKW [69]



- | | | |
|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 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 Voredimentbecken | 15 Trocknung | 21 Silo |
| | 16 Zwischensilo | |

Bild 5.18
Hydrozyklone der Fa. AKW [3]



Eigenschaften ergeben sich für kunststoffverarbeitende Betriebe, insbesondere Spritzgießbetriebe, nicht zuletzt aufgrund der Preisspannen zwischen Neuware und Regenerat interessante Perspektiven.

Bild 5.16 zeigt die Preisentwicklung für HDPE, LDPE, PP und PVC (Neuware) zwischen Mitte 1984 bis Anfang 1988.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die derzeit in der Bundesrepublik angebotenen Verfahren. Am Ende dieses Abschnittes befindet sich eine Übersicht der dargestellten Verfahren.

5.7.1 Amberger Kaolinwerke

Anbieter: AKW Apparate + Verfahren GmbH
Postfach 11 69
D-8452 Hirschau
Tel.: (0 96 22) 1 83 20

Verfahrensbeschreibung (Bild 5.17)

Das Aufbereitungsverfahren ist zur Rückgewinnung einer Polyethylen-Wertfraktion als Regenerat aus vorsortiertem Hausmüll konzipiert.

In der ersten Verfahrensstufe werden die Kunststoffballen vorzerkleinert. Das aufgelockerte Gemisch wird über Förderbänder und Magnetscheider einer Mühlenstation zugeführt, wobei in einem Voredimentbecken gröbere mineralische Verschmutzungen abgeschieden werden. Die Mühle arbeitet mit 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 5.18) 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 trocknen Kunststoffschnitzel vorsiliert 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 Schneckenzonen beheizt wird. Das eintretende Material wird unter Hitze plastifiziert. In einem drucklosen Entgasungsteil werden flüchtige Bestandteile 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. 1.000 kg/h ausgelegt. Als Input dient Ballenware aus der "Grünen Tonne". Alternativ wäre die Verarbeitung von losem Material in Containern aus Gewerbe und Industrie möglich.

Energiebilanz

Der elektrische Energiebedarf beträgt 0,75 kWh/kg.

Produkteigenschaften

Das Regenerat eignet sich i.d.R. zur Herstellung von Folienware. Die Granulatfarbe ergibt sich aus der Mischung des Inputmaterials. Die Akzeptanz des produzierten PE-Regenerates aus Hausmüll ist nach Firmenauskunft gegeben.

Die Schmelzindizes MFI 190/2,16 des aufbereiteten Produktes liegen zwischen 0,3 und 2,0 g/10 min., die Dichte bei 0,94 bis 0,96 g/cm³ und damit im Toleranzbereich entsprechender Neuware.

Wirtschaftlichkeit

Die kalkulierten Produktionskosten der Anlage liegen bei ca. 0,60 DM/kg erzeugtes Granulat und werden während des Probetriebes genauer ermittelt. Bei der Kalkulation wurde von einer kostenlosen Abnahme vorsortierter Kunststoffabfälle ausgegangen.

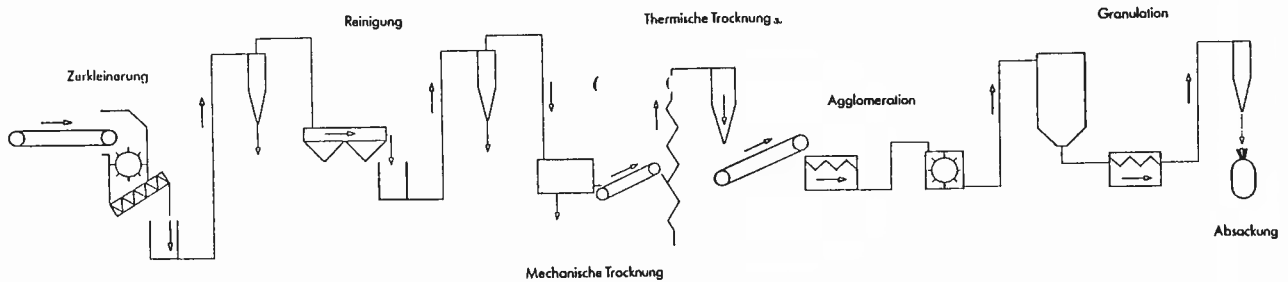
Entwicklungsstand

Die erste Anlage dieser Art wurde im April 1988 in Oberfranken in Betrieb genommen, um die häuslichen Kunststoffabfälle des Einzugsgebietes zu verarbeiten. Zur Überprüfung der theoretischen und experimentellen Werte dient eine dreimonatige Testphase.

Betreiber: Zweckverband Abfallbeseitigung Nord-West-Oberfranken

Standort: Deponie Blumenrod

Bild 5.19
Aufbereitungsverfahren der Fa. Andritz



5.7.2 Andritz

Anbieter: Maschinenfabrik Andritz AG
Postfach 24
A-8045 Graz
Tel.: (03 16) 69 02-0

Verfahrensbeschreibung

Der vorzerkleinerte Rohstoff wird in der Naßschneidmühle nachzerkleinert. Zusätzlich findet hier ein Frikationswascheffekt statt. Anschließend gelangt das Material in eine mehrstufige Reinigungseinrichtung. In der ersten Hydrozyklonstufe werden die spezifisch schweren Teile wie Steine, Glas, Aluminium etc. abgeschieden. Das Material aus dem Hydrozyklon wird in das Schwimm-Sink-Becken geleitet, in dem Polyolefine von anderen Kunststoffen und Verschmutzungen getrennt werden (Bild 5.19).

Die Polyolefine werden einem weiteren Hydrozyklon zugeführt. Der Oberlauf dieser Stufe wird zuerst mechanisch und danach thermisch getrocknet. Das auf diese Weise erhaltene Material gelangt über ein Pufferband in die Agglomerierstufe. Nach einer Zwischenlagerung gelangt das Agglomerat in die Granulation. Das mit Wasser gekühlte Granulat wird in der Absackstation abgefüllt.

Das für die Reinigung der Folien erforderliche Wasser wird im Kreislauf geführt und in Stufen gereinigt, um den Frischwasserbedarf möglichst gering zu halten.

Materialbilanz

Als Einsatzmaterial dienen gemischte und verschmutzte Folien 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 ca. 0,6 kWh/kg Produkt.

Produkteigenschaften

Produziert werden hochwertige PE-Granulate, deren Eigenschaften vom Rohstoff abhängig sind. Selbst bei hoher Verschmutzung des Rohstoffes bzw. 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 µm) geblasen werden.

Wirtschaftlichkeit

Investitionskosten

Grundstück (10.000 m ² á DM 15,-/m ²)	DM	150.000,-
Gebäude für Produktion (ca. 750 m ²), Lager (ca. 250 m ²) und Büros (ca. 250 m ²) inkl. Haustechnik (wie Heizung etc.)	DM	1.200.000,-
Strom, Wasser, Anschlußkosten bzw. Trafo sowie Brunnen	DM	500.000,-
Anlage, komplett inkl. interne Transportmittel	DM	5.300.000,-
Anlaufverluste, Diverses	DM	300.000,-
Gesamt	DM	7.450.000,-

Betriebskosten

Personal	DM	930.000,-
Betriebsspesen	DM	100.000,-
Elektrische Energie	DM	430.000,-
Abwasser, Kanalgebühr	DM	55.000,-
Deponie (Reste)	DM	25.000,-
Prozeßwärme	DM	20.000,-
Instandhaltung	DM	140.000,-
Gesamt	DM	1.700.000,-

evtl. Rohstoffkosten

Preis für verschmutzten Rohstoff DM 100,-/Mg	DM	500.000,-
Gesamt/a	DM	2.200.000,-

Herstellkosten

Für die Ermittlung der Herstellkosten wird angenommen, daß die Gesamtinvestition fremdfinanziert ist.

Bei einer Kreditlaufzeit von 10 Jahren und einem Zinssatz von 8 % p.a. ergibt sich eine jährliche Rate (Kapitaltilgung und Zinsen) von ca. DM 1.110.000,-.

Aus diesem Wert errechnen sich unter Berücksichtigung der Betriebskosten bei einem Durchsatz von 5.000 Mg/a spezifische Kosten von ca. 660 DM/Mg Regranulat.

Die zur Zeit erzielbaren Verkaufspreise betragen 800 bis 1.000 DM/Mg Regranulat.

Entwicklungsstand

Pilotanlage Wien: Mehrjährige Betriebserfahrung (200 kg/h), Vermarktung des Regranulats seit 1986, Versuche mit verschiedenen, stark verunreinigten Kunststoffen (Folien, Formkörper)

Betriebsanlage: Kapazität 5.000 Mg/a PE-Granulat, Inbetriebnahme Mitte 1988

5.7.3 B.u.B. Anlagenbau

Anbieter: B.u.B. Anlagenbau GmbH
Breite Straße 8
D-4156 Willich 1
Tel.: (0 21 54) 25 23

Verfahrensbeschreibung (Bild 5.20)

Die Anlage ist zur Rückgewinnung verschmutzter PE-Abfälle konzipiert. 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 ausgelesen und einer chargenweise betriebenen, zweiten Reinigungsstufe zugeführt. Über die am Silo oder Dosierbehälter integrierten Wiegestäbe wird durch Gewichtsvorwahl ein gleichbleibendes Chargengewicht erreicht.

Die chargenweise in den Waschbehälter (8) eingetragenen Abfälle werden von einem Turbowäscher (9) eingeehrt. 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 ausgelesen.

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 99,999 % 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 Austragschnecke 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 Siebkorbos der Zentrifuge durchgeschlagenen Partikel werden von einer automa-

tisch 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 Nachtrocknenstrecke 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.

Materialbilanz

Als Einsatzmaterial dienen gemischte und verschmutzte Kunststoffabfälle mit einem Hauptanteil an PE (hauptsächlich Tragetaschen). Die Verunreinigungen bestehen im wesentlichen aus Papier, Etiketten und Holz.

Energiebilanz

Die installierte elektrische Leistung der Anlage beträgt ca. 230 kW bei einer Ausbringungsmenge von ca. 500 kg/h PE-Schnitzel. Der spezifische Energieverbrauch ist jedoch abhängig von der Anzahl der Waschzyklen. Der Frischwasserverbrauch beträgt ca. 4 m³/h.

Produkteigenschaften: keine Angaben

Wirtschaftlichkeit: keine Angaben

Entwicklungsstand

Insgesamt wurden 6 Anlagen mit einem Durchsatz von 500 - 1.000 kg/h installiert.

5.7.4 Göschl

Anbieter: Ing. Reinhard Göschl,
Techn. Büro f. Maschinen-, Anlagenbau
Schiltgen 100
A - 2824 Seehenstein
Tel. (02627) 2482

Von der Fa. Göschl wird in Europa ein südafrikanisches Verfahren angeboten.

Verfahrensbeschreibung

Die Anlage ist zur Verarbeitung von schwimmfähigen Kunststoffen konzipiert (Bild 5.21).

Die Kunststoffe werden über ein Förderband (Breite 300 mm) mit Magnetscheider aufgegeben, in einem Naß-Granulator zerkleinert und über ein Förderband in einen 4.000 l Waschtank (aus 3CR12 halbrostfreiem Stahl) geleitet. Hier werden die Kunststoffe durch einen Wirbelmischer (Antriebsleistung 4 kW) gereinigt (Bild 5.22). Anschließend gelangt das Material in eine Beruhigungszone, in der schwere Schmutzpartikel absinken. Über eine Schnecke werden die Kunststoffe in Entwässerungseinheiten gefördert. Die abgesetzten Stoffe werden kontinuierlich durch einen Naßförderer ausgelesen.

Die Entwässerungseinheiten bestehen aus zwei Zickzackrohren mit einer Antriebsleistung von 15 kW.

Bild 5.20
Aufbereitungsverfahren zur Gewinnung von PE-Schnitzeln, System B.u.B. Anlagenbau

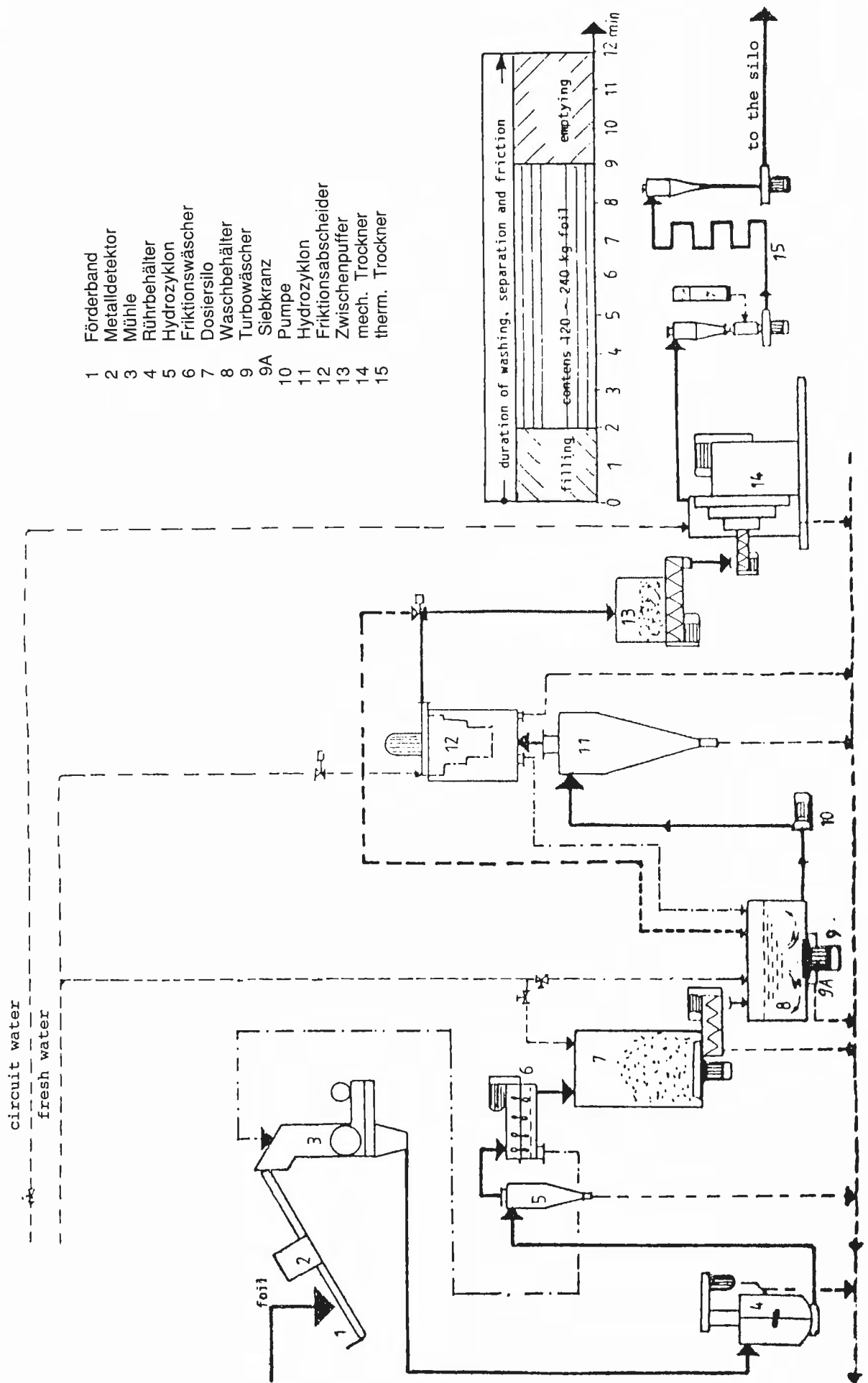


Bild 5.21
Schnitt durch das Aufbereitungsverfahren der Fa. Göschl

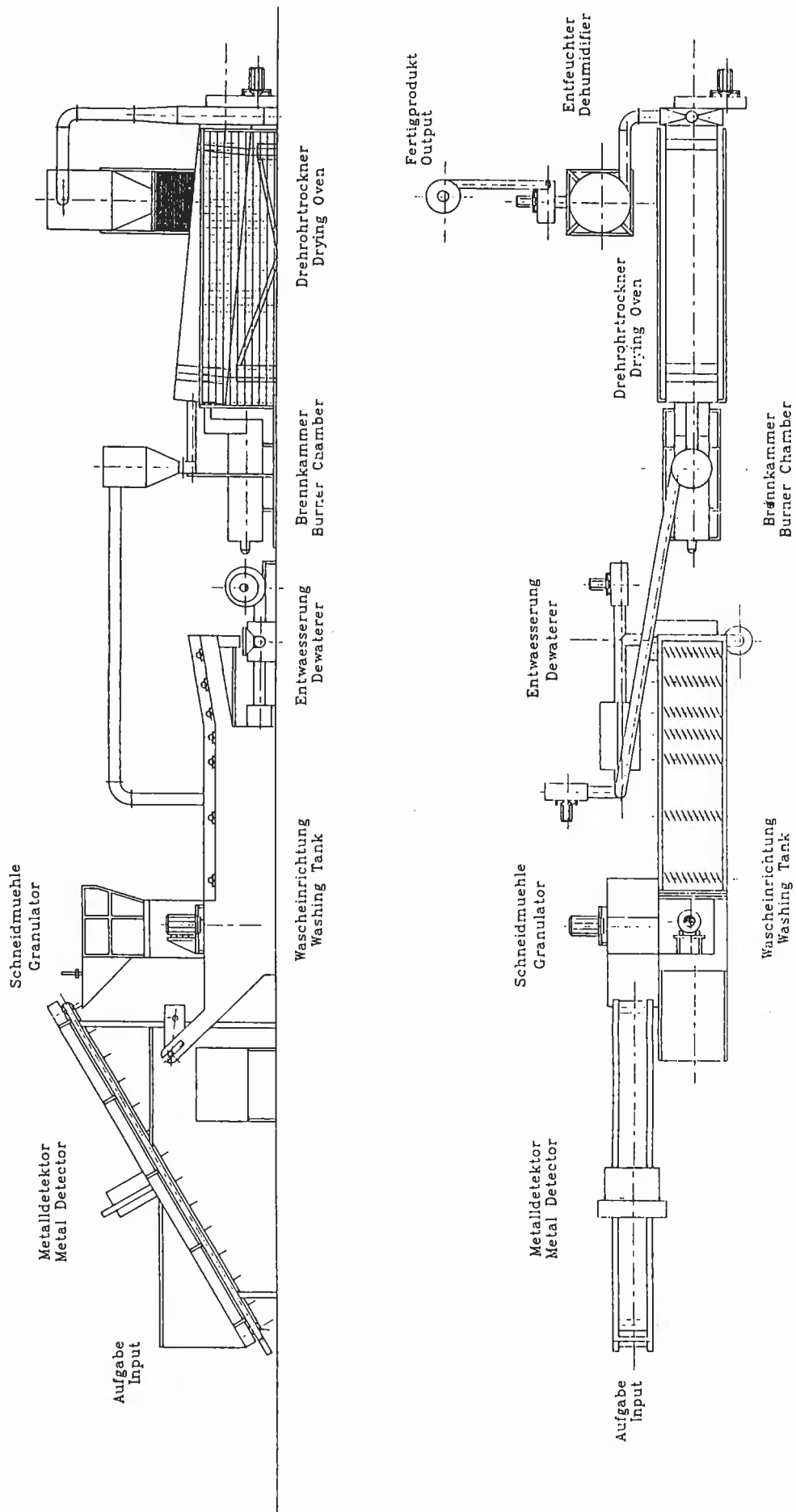


Bild 5.22
Wirbelmischer der Fa. Göschl



Die Trocknung erfolgt durch einen thermostatisierten Trommeltrockner (Leistung 50 kW), der wahlweise durch Gas- oder Ölbrenner beheizt werden kann.

Materialbilanz

Der Durchsatz der Anlage liegt zwischen 150 und 300 kg Kunststoffolien/h.

Energiebilanz

Die installierte elektrische Leistung beträgt 70 kW. Ausgehend von einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,5 bis 0,7 errechnet sich ein spezifischer Energiebedarf von 100 bis 300 kWh/Mg Kunststoff. Hinzu kommt ein Bedarf an Brennstoffenergie von 150 bis 300 kWh/Mg.

Produkteigenschaften: keine Angaben

Wirtschaftlichkeit

Der Anschaffungspreis für eine Anlage mit rund 300 kg/h Durchsatz beträgt frei Betriebsort ca. 300.000,- DM und beinhaltet den Aufgabeförderer mit Metalldetektor, Naßzerkleinerung, Wäscher und den gasbefeuerten Trockner.

Entwicklungsstand

In Südafrika sind 10 Anlagen in Betrieb, zum Teil seit 14 Jahren.

5.7.5 Herbold

Anbieter: Herbold GmbH Maschinenfabrik
Industriestr. 23
D - 6922 Meckesheim
Tel.: (0 62 26) 53-0

Die Firma ist Hersteller von Einzelaggregaten und kompletten Anlagen zur Zerkleinerung und Wäsche von Abfallkunststoffen aus dem gewerblichen/industriellen und landwirtschaftlichen Bereichen sowie aus Hausmüll. Das von der Fa. Buckau-Wolf in den 70er Jahren entwickelte Verfahren (Zerkleinerung, Wäsche, Trocknung) wurde von der Fa. Herbold übernommen und weiterentwickelt.

Verfahrensbeschreibung (Bilder 5.23, 5.24)

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 Absatzbecken 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 der Mühle fällt das Material in einen Friktionswäscher, aus dem es mittels einer schnelllaufenden Schnecke (Teilentwässerung) ausgetragen und in einen mechanischen Trockner gefördert wird. Durch den

Bild 5.23
Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage der Fa. Herbold

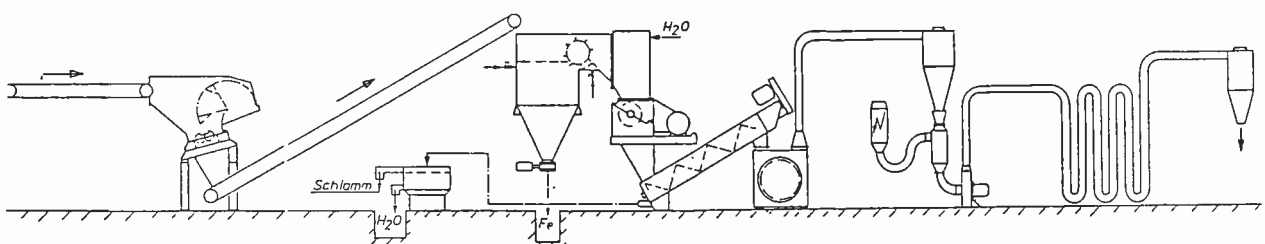


Bild 5.24
Kunststoff-Aufbereitungsanlage
der Fa. Herbold



mechanischen Trockner wird die Feuchtigkeit der Kunststoffschnitzel auf 3 bis 8 % reduziert. In einer zweiten Trocknungsstufe werden die Schnitzel thermisch nachgetrocknet.

Zwischen den Friktionswäscher und den mechanischen Trockner kann ein Trennbehälter geschaltet werden, so daß Verunreinigungen, die schwerer als Wasser sind, fast 100 %ig abgeschieden werden können. Die ge-

trockneten und gereinigten Kunststoffschnitzel werden schließlich einer Granulierung zugeführt. Dabei können Verschnitte mit neuem Kunststoff, Einfärbungen usw. erfolgen.

Materialbilanz

Als Einsatzstoffe dienen vorwiegend verschmutzte PE-Folien.

Energiebilanz

Installierte elektrische Leistung	normal verschmutzt (z.B. Schrumpfhäuben)		stark verschmutzt (z.B. Landwirtschaftsfolie)	
	Durchsatzleistung 500 kg/h	1000 kg/h	Durchsatzleistung 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
Friktionswäscher	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

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

Weltweit wurden 35 Anlagen installiert, teilweise für Kunststoffe aus dem Hausmüll. Eine Technikumsanlage steht für Versuche zur Verfügung.

5.7.6 REAL

Anbieter: Real GmbH
Postfach
D-8717 Mainbernheim
Tel. (0 93 23) 35 25

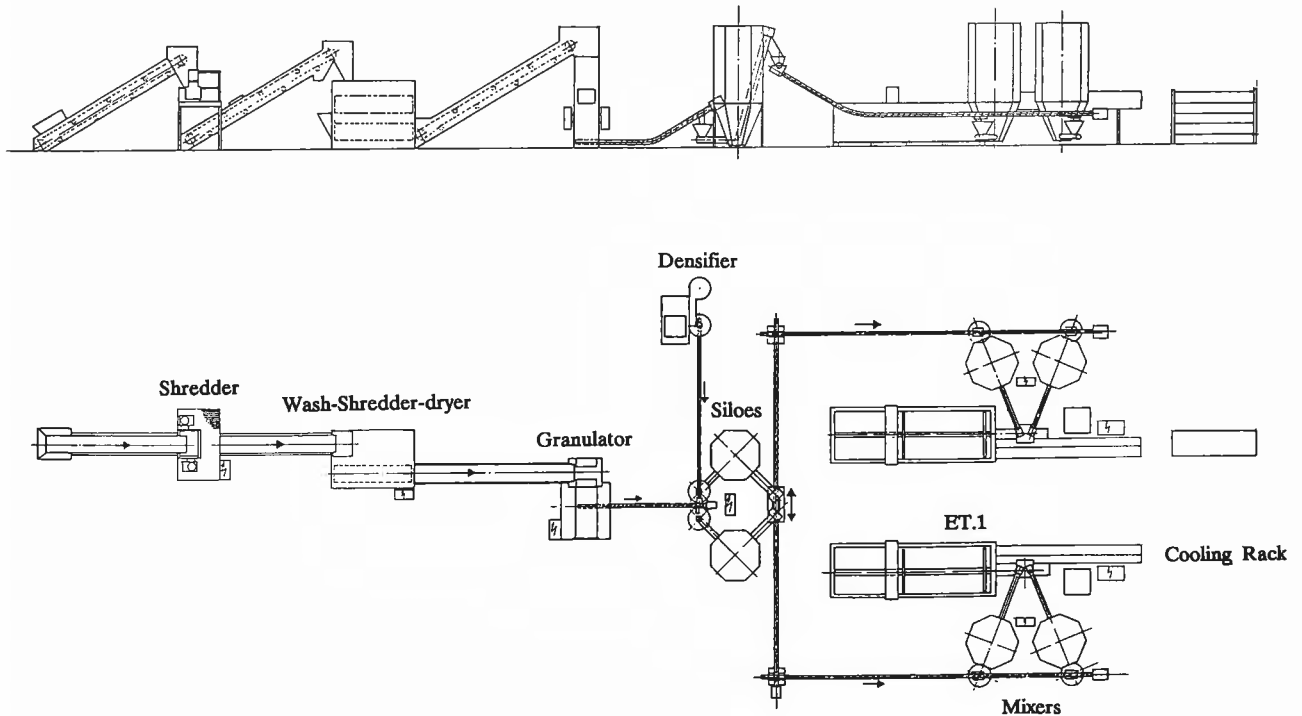
Verfahrensbeschreibung (Bild 5.25)

Das Rohmaterial wird zunächst zerkleinert und gesiebt, um Schmutzstoffe (harte oder abrasive Materialien) zu entfernen. In einem nachgeschalteten Magnetscheider werden eisenhaltige Verschmutzungen abgetrennt.

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.

Bild 5.25

Aufbereitungsanlage der Fa. Real für Kunststoffe aus Hausmüll



In einer zweiten Zerkleinerungsstufe (Schneidmühle) wird das Material auf die erforderliche Korngröße nach-zerkleinert. 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 Formenträger, 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.

Materialbilanz

Als Rohmaterialquellen sind nach Herstellerangaben geeignet

- Industrieabfälle aus der
 - Verpackungsindustrie
 - Automobil- und -zubehörindustrie
 - Kunststoffwiederverwertungsbranche
- Kunststoffe aus Hausmüll

Energiebilanz

Installierte elektr. Leistung: 276 kW bei 300 kg/h

Verbrauchte elektr. Leistung: 236 kWh bei 300 kg

Produkteigenschaften

Auf der Anlage werden Pfosten, Masten, Pfähle, Leisten etc. hergestellt (Bild 5.26), bei denen die Länge im Verhältnis zum Querschnitt groß ist und bei denen der Querschnitt entweder konstant ist oder nur in einer Richtung verjüngt wird. Je nach Anforderungen des Marktes und technischen Einschränkungen der Materialien und Gießformen sind quadratische, runde, rechteckige, ovale, trapezförmige oder unregelmäßige 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.

Bild 5.26
Pfähle aus Sekundärkunststoffen
der Fa. Art, Belgien



Das Produkt hat Bearbeitungseigenschaften, die denen von Holz sehr ähnlich sind, so daß die Produkte mit herkömmlichen Holzbearbeitungsmaschinen oder -werkzeugen bearbeitet werden können.

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	-25	DM/kWh

$$\text{Energiekosten/kg} = \frac{E \cdot 236 \times F \cdot 0,25}{B \cdot 300} = 0,19 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Personalkosten/kg} = \frac{E \cdot 236 \times F \cdot 0,25}{B \cdot 300} = 0,23 \text{ DM/kg}$$

Verschleißkosten	= 0,12 DM/kg
Administration und Verkauf	= 0,04 DM/kg
Summe Produktionskosten	= 0,58 DM/kg

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	Jahre	7
F = Abschreibung Gebäude	Jahre	15

kapitalabhängige Kosten

$$\text{Kapitalzins} = \frac{(A+B) \cdot 1.520.000 \times D \cdot 8}{C \cdot 960.000 \times 100} = 0,13 \text{ DM/kg}$$

Abschreibung

$$\text{Maschinen} = \frac{A \cdot 1.500.000}{E \cdot 7 \times C \cdot 960.000} = 0,22 \text{ DM/kg}$$

$$\text{Gebäude} = \frac{B \cdot 20.000}{F \cdot 15 \times C \cdot 960.000} = 0,01 \text{ DM/kg}$$

Summe Investition und Abschreibung	0,36 DM/kg
Summe Produktionskosten	0,58 DM/kg
Summe Betriebskosten	0,94 DM/kg
Verkaufspreis	2,80 DM/kg
Gewinn	1,86 DM/kg

$$\text{Gewinn pro Jahr} = 1.785.600 \text{ DM}$$

Entwicklungsstand

Durch die belgische Firma ART Ltd., B-9660 Brakel wurden insgesamt 20 Anlagen aufgestellt.

Referenzanlagen in der Bundesrepublik Deutschland:

- Städtereinigung Nord, Flensburg
- Fritz oHG, Dietzhölztal
- Pfitzenmeier + Rau, Knittlingen

5.7.7 Recycloplast

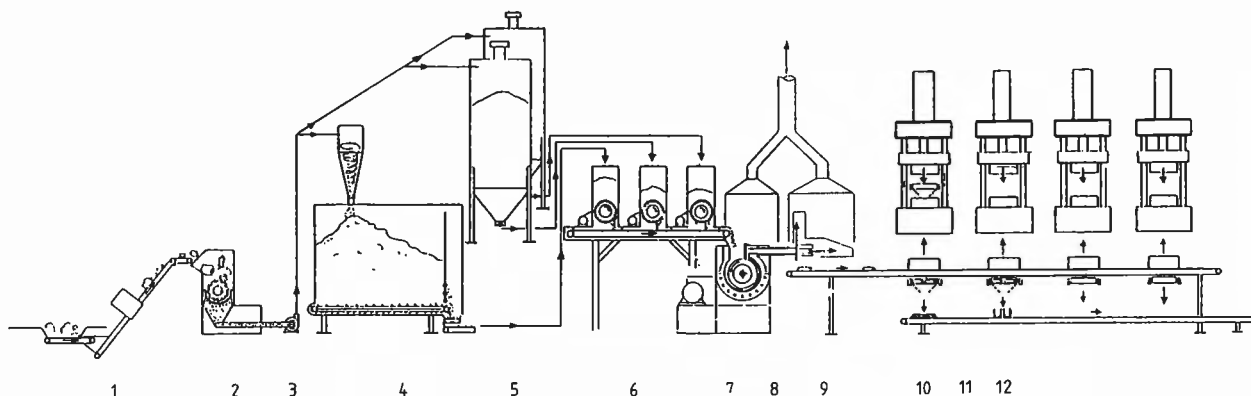
Anbieter: Recycloplast AG
 8195 Egling Neukolbing 1
 Tel.: (0 81 76) 5 21

Verfahrensbeschreibung (Bild 5.27)

Die Kunststoffabfälle werden über ein Beschickungsband mit Magnetscheider oder von Hand einer Schneidemühle zugeführt. Mittels eines Sauggebläses wird das Mahlgut in Vorratssilos oder Container befördert und anschließend in die jeweiligen Walzenzellschleusen der Dosiereinheit transportiert.

Bild 5.27

Aufbereitungsverfahren der Fa. Recycloplast für Kunststoffabfälle



- 1 Mühlenbeschickung mit Metallseparator
- 2 Schneidmühle mit gekühlten Werkzeugen
- 3 Absauggebläse
- 4 Silo-/Containerlagerung

- 5 mech. Förderung
- 6 Dosiereinheit mit Zelleradschleusen
- 7 Plastifikator
- 8 Entgasungseinrichtung/ Rauchgas-Wäscher

- 9 Plastifikat-Dosierung
- 10 Autom. Pressenbeschickung
- 11 Pressen
- 12 Autom. Pressenentnahme

Die Walzenzellradschleusen sind konstruktiv so gestaltet, daß auch dosierproblematische Materialien gleichmäßig auf der gesamten Bandbreite des Förderbandes übergeben werden können.

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.

Durch die Art der Dosiereinrichtungen kann der Anteil der Thermoplaste durch Beimischen von Primärkunststoffen - je nach Anforderung an Festigkeit und Oberfläche des Endproduktes - verändert werden. Zusätzlich können über die Dosiergeräte Farben, Füllstoffe und sonstige Zuschläge in das Gemisch eingebracht werden.

Die Materialentgasung im Plastifikator kann aufgrund der offenen Walzengehäuse-Konstruktion ungehindert stattfinden. 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.

Entsprechend dem herzustellenden Produkt wird der kontinuierlich austretende Plastifikatstrang portioniert und durch eine vollautomatisch arbeitende Pressenbeschickungsanlage den Preßformen übergeben. Anschließend wird die Kunststoffmasse unter hohem Druck verformt, gekühlt und als fertig geformte Produkte den hydraulischen Säulenpressen entnommen.

Wassergekühlte Presswerkzeuge sorgen für eine einwandfreie Verformung und schnelles Abkühlen des Produktes von 150 auf 40°C. Die Kühlzeit beträgt 2 - 3

Minuten. Da der Plastifikator einen höheren Ausstoß hat, als von einer Presse verarbeitet werden kann, werden i.d.R. mehrere Pressen parallel geschaltet.

Die Möglichkeit einer Verarbeitung des Recycloplastifikats 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 500 - 1.000 kg/h entsprechend 2.500 - 3.000 Mg/a bei 500 kg/h und 3 Schichten.

Energiebilanz

Installierte elektrische Leistung: 700 kW
Energieverbrauch: 400 kW
Wasser f. Kühlung und Abluftreinigung: 2-3 m³/h
Druckluft: 4 m³/h (6 bar)

Produkteigenschaften keine Angaben

Wirtschaftlichkeit

Platzbedarf:
- Maschinenhalle 800 m²
- Nebenräume 200 m²
- Rohmateriallager 1.500 m²
- Fertigwarenlager 1.500 m²

Entwicklungsstand

Referenzanlagen:

- Recycloplast, Neukolbing seit Nov. 1983
- Remaplan, München seit 1986
- Recyclen, Osterburken seit 1987
- 3 Anlagen in den USA und der Schweiz

Betriebszeit	2 Schicht	3 Schicht
<u>Kosten</u>		
Rohstoff-Kosten	0	0
Personal- + Nebenkosten	384.000	576.000
Instandhaltungskosten	150.000	200.000
Energiekosten	190.000	240.000
AFA (8,6 Mio DM auf 10 J.)	860.000	860.000
Kapitalverzinsung	310.000	310.000
Miete	480.000	480.000
Versicherung	40.000	40.000
Summe Kosten	2.414.000	2.706.000
Umsatz	2.688.000	4.032.000
<u>Amortisation</u>		
Erlös	274.000	1.326.000
AFA (8,6 Mio DM auf 10 J.)	860.000	860.000
Kapitalverzinsung	310.000	310.000
./. Ertragssteuern	164.000	793.000
Summe	1.280.000	1.701.000
Amortisationsdauer	6,7 Jahre	5,0 Jahre

5.7.8 RGR

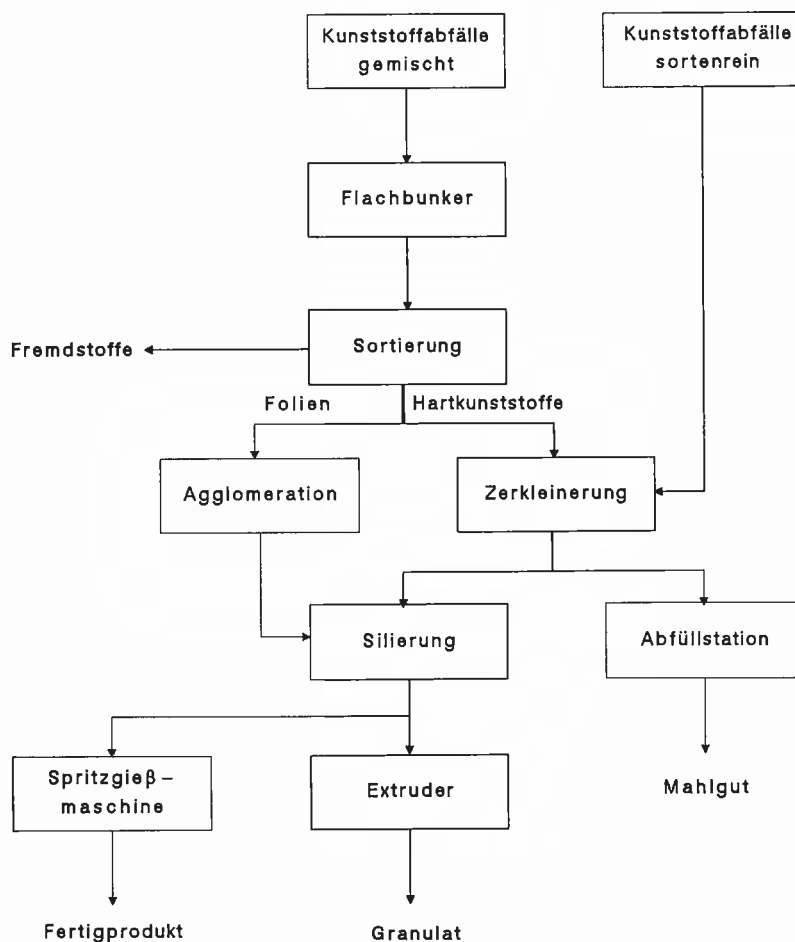
Anbieter: Recycling Gesellschaft für
Rohstoffrückgewinnung mbH & Co (ALBA)
Flottenstr. 7-8
D-1000 Berlin 51
Tel.: (030) 40 90 7-0

Verfahrensbeschreibung (Bild 5.28)

Bild 5.28
Verfahrensschema der Kunst-
stoffaufbereitung der Fa. RGR

Die Anlage verarbeitet sortenreine und gemischte Kunststoffabfälle (Hart- und Weichkunststoffe), soweit diese weitgehend unverschmutzt sind.

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 (Stranggranulierung) zu Granulat weiterzuverarbeiten. Aussortierte Folien werden in einem Agglomerator behandelt. Aus einem Teil des Mahlgutes werden auf einer Spritzgießmaschine Fertigprodukte hergestellt.

Materialbilanz

Der Durchsatz der Anlage beträgt je nach Material zwischen 250 und 750 kg/h.

Energiebilanz

Installierte Leistung der Anlage 350 kW

Produkteigenschaften

Es werden marktgängige Regranulate und Mahlgüter sowie gegebenenfalls Fertigprodukte hergestellt.

Wirtschaftlichkeit

Die spezifischen Kosten betragen je nach Fertigungstiefe zwischen 0,50 - 1,00 DM/kg Fertigprodukt.

Entwicklungsstand

Betriebsanlage seit Mitte 1984

5.7.9 Wormser Kunststoff Recycling

Anbieter: vertreten durch B & B Marketing
Hornstr. 1
D-4503 Lissen ATW
Tel.: (05421) 748

Verfahrensbeschreibung (Bild 5.29)

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 %.

Die Altkunststoffe werden auf eine Korngröße von ca. 6 mm zerkleinert und über einen Walzenextruder plastifiziert. Die Herstellung der Formkörper erfolgt entweder im Spritzgieß- 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 300 kg/h entsprechend 600 Mg/a.

Energiebilanz

Die installierte elektrische Leistung liegt bei 70 kW. Die installierte Heizleistung beträgt 100 kW.

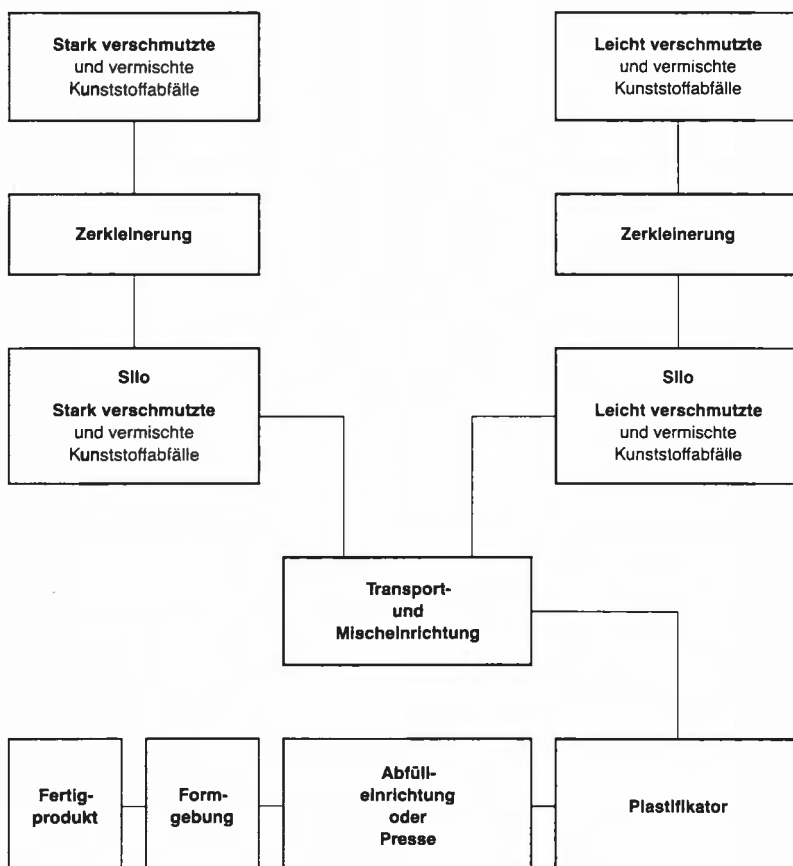
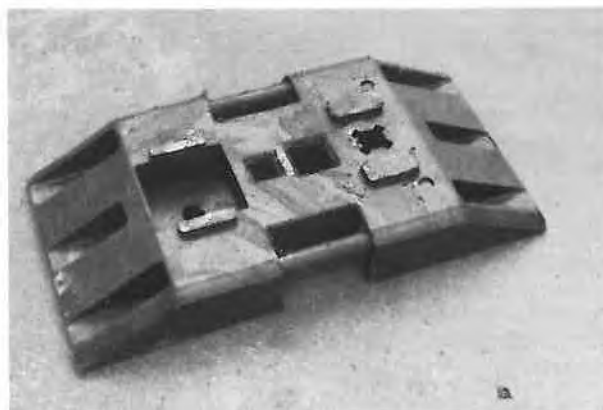


Bild 5.29
Aufbereitungsverfahren der
Fa. WKR

Bild 5.30
Begrenzungspfähle aus Sekundärkunststoffen der Fa. WKR hergestellt im Spritzgießverfahren



Bild 5.31
Bakenfuß aus Recyclingkunststoff hergestellt im Spritzpreßverfahren



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 (Bild 5.30) und Bakenfüße (Bild 5.31).

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 m² überdacht
500 m² Freigelände

Erlös: 1.500 - 2.000 DM/Mg

Zerkleinerungskosten: 0,28 - 0,32 DM/kg

5.7.10 Zusammenstellung der Verfahren

Die Zusammenstellung der Verfahren zur Aufbereitung von Kunststoffabfällen aus Hausmüll und Gewerbeabfällen zeigt Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7
Zusammenstellung der Aufbereitungsverfahren für Kunststoffabfälle aus Haus- und Gewerbeabfällen

Anbieter	Einsatzstoffe	Produkte	Verfahrensschritte (Erläuterung s.u.)	Durchsatz [kg/h]	Energiebedarf [kWh/Mg]	Kosten [DM/Mg]
AKW	verschmutzte+ vermischte Kunststoffe	hochwertiges PE-Granulat	1, 2, 4, 8, 9, 10	1.000	750	3 Schicht: 600,--
Andritz	verschmutzte Folien	hochwertiges PE-Granulat	1,2,4,5,4,8,10	1.000	600	1 Schicht: 560,--
B.u.B.	verschmutzte PE-Abfälle	gereinigte PE-Schnitzel	3,1,4,7,4,6,8,8	500	275 ^{1,2)}	Keine Angaben
Göschl	verschmutzte Kunststoffe		3, 2, 7, 8, 10	150 - 300	250 - 600	nur Investitionskosten: 300.000,--
Herbold	verschmutzte Kunststoffe	hochwertiges PE-Granulat	2, 5, 1, 8, 9	100 - 1500	120 - 160 ¹⁾	1 Schicht, 100 kg/h: Aufbereitung: 300 - 500 Extrusion: 200 - 300
Real	verschmutzte+ vermischte Kunststoffe	dickwandige Produkte	1,6,3,7,8,9,10	300	790	1 Schicht: 940,--
Recycloplast	verschmutzte+ vermischte Kunststoffe	dickwandige Produkte	3, 1, 10, 11	500 - 1000	300 - 600	1 Schicht: 700,-- 2 Schicht: 590,-- 3 Schicht: 550,--
RGR	sortenreine + vermischte Kunststoffe	Mahlgut/ hochwertiges Granulat	1, (10)	250 - 750	850 - 2500	500,- bis 1000,-
WKR	verschmutzte+ vermischte Kunststoffe	dickwandig f. Straßen-/ Gartenbau	1, 10, 11	300	340 ²⁾	1 Schicht, nur Zerkleinerung: 280 - 320,--
Verfahrensschritte:			4 Hydrozyklon	8 Trockner (mech./therm.)	1) o. Plastifi.	AfA/Personal/Energie, jedoch o. Rohstoff- Kosten
1 Zerkleinerung	5 Schwimm-Sink-Scheider	9 Homogenisierung			2) 60 % der	
2 Naßzerkleinerung	6 Siebung	10 Plastifizierung			install.	
3 Magnetscheider	7 Wäscher	11 Produktherstellung			Leistung	

6 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.

1986 wurden etwa 7 Mio Mg Kunststoffe verkauft und bearbeitet. Durch die Be- und Verarbeitung von Kunststoffen sowie durch den Konsum insbesondere von Verpackungsmaterialien entstanden ca. 1,8 Mio Mg Kunststoffabfälle. Davon wurden ca. 0,5 Mio Mg recycelt.

Vorwiegend verwertbar sind sortenreine Kunststoffe aus dem kunststoffbe- und -verarbeitenden Gewerbe, wobei das innerbetriebliche Recycling zur Zeit statistisch nicht erfaßt wird und ebenfalls berücksichtigt werden muß. Die gemischten Kunststoffe aus den Haushalten betragen ca. 0,8 Mio Mg und werden kaum wiederverwertet. 1984 betrug die verwertete Menge an Kunststoffen aus dem Hausmüll nur ca. 1.000 Mg, die sich auf ca. 1.500 Mg im Jahre 1986 erhöhte.

Kunststoffabfälle können, wie die Untersuchungen in Hamburg, Berlin etc. gezeigt haben, besonders gut in den Ballungsgebieten sowie in Gewerbebetrieben verstärkt erfaßt werden. Damit läßt sich - gemäß der Daten von 1986 - für die Bundesrepublik Deutschland ein leicht erfaßbares Potential von 0,6 Mio Mg an Kunststoffabfällen abschätzen.

Der Kunststoffabfall im Haus-, Sperr- und Gewerbemüll 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.

Bereits heute wird deutlich, daß im Bereich der billigen Massenware aus Recyclingkunststoff nur geringe Innovationschancen liegen dürften. Dieser Bereich erlaubt weder eine kostendeckende Preisgestaltung, noch eine langfristige Marktausschöpfung. Mit Massenprodukten wie Topfuntersetzer, Schalen, Blumenkästen, Kübel, Pfähle etc. wird das Kunststoffverwertungspotential der Zukunft nicht genutzt werden können.

Um in der Zukunft auf dem Markt mit Recyclingprodukten aus Kunststoff bestehen zu können, müssen zukunftssträchtige Produktbereiche ermittelt werden. Zur Zeit werden verschiedene Produkte von kleineren Firmen hergestellt, ohne daß Gutachten über die technischen Eigenschaften bzw. die Marktmöglichkeiten erstellt wurden. Vermutlich aus Kostengründen wird diese Aufgabe an Zwischenhändler und auf Kunden abgewälzt.

Bei der Überlegung nach möglichen Produkten lassen sich die folgenden Marktbereiche darstellen, die für Innovationen in Frage kommen:

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
 - Pyrolyse 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 Pyrolyse) 32.000 Mg/a

Die Aufstellung zeigt, daß ca. 130.500 Mg Kunststoffabfälle pro Jahr zu neuen Produkten verarbeitet und abgesetzt werden könnten.

Die Probleme bei der Verwertung von Altkunststoffen und der damit anvisierten Mengenziele bestehen in den folgenden Punkten:

- Der Altkunststoff aus dem Hausmüll ist sehr heterogen und hat je nach Sammel- und Aufbereitungsmethode einen hohen Verschmutzungsgrad durch Hausmüllkomponenten wie anhaftende Speisereste, Farben, Kleber etc. Die Erfassungs- und Sammelkosten betragen für das Holsystem ca. 2.500 DM/Mg und für das Bringsystem 400 bis 700 DM/Mg und stellen bezüglich der Wirtschaftlichkeit einer Verwertungsanlage einen hohen Kostenfaktor dar.
- Die Qualitätsanforderungen an das Kunststoffrohmaterial sind außerordentlich hoch. Die Verwendung von nicht sortenreinen Kunststoffen stößt auf große Skepsis, da Schwierigkeiten mit Abnehmerbetrieben befürchtet werden. Die Verarbeitungsmöglichkeiten werden als nicht erprobt und die Eigenschaften der Recyclingprodukte (dickwandig, mangelnde Farbbeständigkeit etc.) als nicht marktgerecht angesehen.
- Kunststoffverarbeitende Betriebe sind nur zögernd bereit, außerhalb ihrer eigenen Produktionsrichtung zu diversifizieren, zumal mit einem nicht imagefördernden Produkt.
- Der Ölpreis wirkt sich besonders im Kunststoffbereich stark aus. Der Preisverfall von Primärkunststoffen am Markt hat den Spielraum für ein wirtschaftliches Kunststoffrecycling stark eingeschränkt. Im Durchschnitt liegt der Preis z.B. für sortenreine Sekundärware um ca. ein Drittel unter dem Preis für vergleichbare Primärkunststoffe. Durch den Preisverfall sinkt die absolute Höhe des Preisvorteils von

Sekundärware, so daß der wirtschaftliche Vorteil vom Einkäufer nicht mehr so deutlich gesehen wird.

Das Marktpotential an Recyclingprodukten kann das gegenwärtig erfaßbare Altkunststoffpotential von ca. 600.000 Mg/a nur zum Teil nutzen. Vor allem der verstärkte Anfall an langlebigen Kunststoffprodukten im Abfall der nächsten Jahre erfordert die thermische Verwertung und Nutzbarmachung. Die Pyrolyseverfahren bieten in wirtschaftlichen Baugrößen von mindestens 15.000 bis 20.000 Mg/a die Möglichkeit, die polymeren Kunststoffe auf monomere Chemierohstoffe zurückzuführen und damit neue Rohstoffe zur Verfügung zu stellen.

Aus energetischer Sicht sollten die direkten Recyclingverfahren über die Schmelze vorrangig genutzt werden,

da neben den Verlusten und der Prozeßenergie für die aufwendige Aktivierung der zu verwertenden Pyrolysekokse die Energie für die Polymerisation von neuen Kunststoffen bei der Gesamtenergiebilanz hinzuge-rechnet werden muß.

Die Pyrolyse eignet sich aber für die überschüssigen und nicht thermoplastischen Kunststoffabfälle sowie auch für die zukünftigen Recyclingprodukte, die heute produziert bis zur Jahrtausendwende auch wieder zu Abfall werden.

Nach der Erprobung der Pyrolysetechnik im Großmaßstab bietet sich auf der heutigen Datenbasis die Möglichkeit, ca. 20 Pyrolyseanlagen in den Ballungszentren der Bundesrepublik mit Altkunststoff zu beschicken und zu betreiben.

7 Literaturverzeichnis

- (1) ABB: Div. Firmenunterlagen
- (2) Ackermann, F.H.: Energie-Recycling durch Reststoff-Pyrolyse, in: (79)
- (3) AKW: Diverse Firmenunterlagen
- (4) Andritz: Diverse Firmenunterlagen
- (5) B & B Marketing: Persönliche Mitteilungen
- (6) Bach, H.-J.: Zerkleinerung als Maßnahme zur direkten Wiederverwendung von Thermoplasten aus Teilen, in: (79), S. 215 ff.
- (7) Bahr, A.; Vogt, V.; Djawadi, H.: Sortierung von Kunststoffabfällen, Teilbericht 4 des Forschungsprogrammes, Wiederverwertung von Kunststoffen, TU Clausthal, Clausthal 1980
- (8) Barghoorn, M. et.al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1979/80, Bericht Nr. 10303503 im Auftrag des UBA, Berlin 1981
- (9) Barghoorn, M. et.al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1983-85, Bericht Nr. 10303508 im Auftrag des UBA, Berlin 1986
- (10) Barniske, L.: Stand der thermischen Abfallbehandlung in der Bundesrepublik Deutschland, in: VDI Berichte 637, Thermische Abfallbehandlung in Entsorgungskonzepten, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987
- (11) Baubehörde Hamburg: Zwischenbericht des Pilotprojektes "Getrennte Kunststoffsammlung" in Bergedorf, 1986 (unveröffentlicht)
- (12) Bauer, G.: Praktische Erfahrungen mit einer Anlage zur Verwertung von Polyurethanschaumstoffabfällen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling International, EF-Verlag, Berlin 1984, S. 658 ff.
- (13) Baumann, H.; Hinterhofer, O.: Entsorgung und Recycling von Kunststoff-Abfällen, in: Phoenix International 4/86, S. 10 ff
- (14) Beck, E.: Die Wiederverwendung von stark verschmutzten und vermischten thermoplastischen Kunststoffabfällen in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling Berlin 79, EF-Verlag, Berlin 1979, S. 1310 ff
- (15) Bilitewski, B.: Recyclinganlagen für Haus- und Gewerbeabfälle, Beiheft 21 zu Müll und Abfall, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1985
- (16) Bockhorn, H.; Burckschat, M.: Recycling von Kunststoffabfällen durch partielle Oxidation, in: (79), S.209 ff
- (17) Bonau, H.; Tiemann, V.: Schnellcharakterisierung von Thermoplastrecyclaten mit dem Mikroskop, in: (79)
- (18) Brahms, E.; Eder G.; Greiner, B.: Papier-Kunststoff- Verpackungen - Mengen und Schadstoffbetrachtung -BMFT- Forschungsbericht 143 03 68, 1988
- (19) Brandrup, J.: Wiederverwertung von Kunststoffabfällen in der BR-Deutschland unter besonderer Berücksichtigung des Forschungsprogrammes des Verbandes der Kunststoffherstellenden Industrie e.V., in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling Berlin '79, E. Freitag Verlag, Berlin 1979
- (20) Brenner, W., Baumberger, H.: Abluftbehandlung beim thermischen Kunststoffrecycling, in: Phoenix International Heft 6/87, S. 28 - 32
- (21) Carlowitz, B.: Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen, 5. Aufl., Kunststoff Verlag, Isernhagen 1981
- (22) Curlee, T.R.: Plastics Recycling: Economic and Institutional Issues, in: Conservation & Recycling, GBR (1986), No. 4
- (23) Dahlern, I. von: Neuer Kunststoff aus PUR-Abfällen, Der Tagesspiegel, 20.02.88
- (24) Deutscher Industrie- und Handelstag (DIHT): Statistik der Abfallbörse 1986, Mitteilung an die Industrie- und Handelskammern, 1987
- (25) Dickhäuser, K.: Sortenreinheit als oberstes Gebot, Umwelt 6/86, S. 464 ff.
- (26) Drink, H.M.; Rühmann, H.: Erfassung von Kunststoffabfällen, Teilbericht 1 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, RWTH Aachen, Aachen 1977
- (27) Eder, G.: Aufkommen und Schadstoffbelastung von Kunststoffabfällen, in: (79)
- (28) Emminger, H.: Verwertung von Kunststoffen aus kommunalen Abfällen, Müll und Abfall 5/85 + 8/85
- (29) Ferber, M.: Neues Verfahren für ein Kunststoffrecycling, Müll und Abfall 1/88, S. 28 f
- (30) Franke, M.: Großversuch soll Verwertbarkeit von Weichspülerflaschen klären, in: FGU, Berlin: Umwelttechnik Berlin, Nr. 7/Feb. 88
- (31) Franke, M.: Kunststoffverpackungen im Recycling-Test, Umwelt 3/88, S. 66 ff.
- (32) Franzkoch, B. et al.: Verwertung von Kunststoffabfällen über die Schmelze, Teilprojekt 7 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, RWTH Aachen, Aachen 1979
- (33) Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. (GKV), Jahresbericht 1985/86
- (34) Goepfert u. Reimer: Sammlung von Kunststoffabfällen, Bericht für das Programm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Teilprojekt 2, Hrsg. Verband Kunststoffherstellende Industrie, 1978
- (35) Grigat, E.: Hydrolyse von Polyurethen-Weichschaumabfällen, Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling Berlin 1979, EF Verlag, Berlin 1979, S. 1331 ff.
- (36) Grossmayer, G.: Wiederverwertung von Kunststoffabfällen unter besonderer Berücksichtigung des Hausmülls, Müll & Abfall 4/88, S. 170 f.
- (37) Halter, H.: Recycling durch Regenerierung verschmutzter Folienabfälle mit einer mikroprozessor-gesteuerten Extrusionsanlage, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling International, EF Verlag, Berlin 1984, S. 652 ff.

- (38) Hawkins, W. L.: Recycling of Polymers, in: Conservation & Recycling, GBR, 1987, No.1
- (39) Herrler, J.: Ist ein umweltverträgliches Recycling von Kunststoffabfällen aus Haushaltsabfällen möglich?, in: (79), S. 231 ff.
- (40) Herrler, J.: Stand der Entwicklung von Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle aus Müll unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, Öko-Institut, Freiburg 1985
- (41) Heß, H.: Öl aus Plastik, Badische Zeitung v. 09.07.87
- (42) ICI: BIOPOL - natürliche Thermoplaste, (Firmeninformation)
- (43) INTECUS: Untersuchung von Kunststoffabfällen; Abfallvermeidung - parallel zur optimalen Wertstoffverwertung bei der getrennten Sammlung -; unveröffentlichte Studien im Auftrag der Baubehörde Hamburg 1987/88
- (44) Käufer, H.: Aktives Recycling von Kunststoffen, in: (79)
- (45) Käufer, H.: Recyclingfreundliche Kunststoffprodukte, Umwelt 6/86, S. 459 ff.
- (46) Kaminsky, W. et al.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen in der Wirbelschicht, Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling International, EF Verlag, Berlin 1984
- (47) Kaminsky, W.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen und Altreifen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Pyrolyse von Kunststoffabfällen, EF Verlag, Berlin 1985
- (48) Kaminsky, W.; Sinn, H.: Pyrolyse von Kunststoffabfällen Teilprojekt des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, Hamburg 1981
- (49) Kanuit, P.: Wirtschaftliche Kunststoffrückgewinnung aus kommunalen und industriellen Abfällen, in: VKS (Hrsg.): Ausstellerforum Abfall, Kommunal-schriften-Verlag, München 1987
- (50) Leschonski, K.; Goritzke, W.; Röthele: Aufbereitung von Kunststoffabfällen zum Zwecke der Wiederverwertung (Zerkleinern, Klassieren), Forschungsprogramm Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, April 1981
- (51) Liebl, P.; Wewerka, D.: Die energetische Verwertung von Altreifen bei der Gmündener Zementwerke Hans Hatschek AG; Müll und Abfall 2/83, S. 54 ff.
- (52) Lützw, W; Pastuska, G.: Materialprüfung zur Beurteilung mehrmals wiederverarbeiteter Thermoplaste, in: (79)
- (53) Menges, G; Rühmann, H.: Erfassung von Kunststoffabfällen, Teilprojekt 1 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, RWTH Aachen 1977
- (54) Niederdelmann, G. et al.: Hydrolyse von Kunststoffabfällen, Teilprojekt 6 des Forschungsprogrammes Wiederverwertung von Kunststoffabfällen, 1979
- (55) N.N.: Coca Cola und das PET-Flaschenrecycling, in: Kunststoff-Information Nr. 875/14.4.88, Bad Homburg, S. 2
- (56) N.N.: Erfahrung mit der Pyrolyse kann nicht schrecken, Handelsblatt v. 24.02.88
- (57) N.N.: Erfolge beim Umweltschutz: Aus Kunststoff wird wieder Öl, Berliner Morgenpost v. 12.07.87
- (58) N.N.: Kunststoffabfälle, Materialien des Umweltbundesamtes zum Abfallwirtschaftsprogramm der Bundesregierung 2/76, Berlin 1979
- (59) N.N.: Kunststofferzeuger wollen Abfall verringern, in: DER TAGESSPIEGEL v. 27.4.88
- (60) N.N.: Kunststoff-Information Nr. 864/28.1.88, Bad Homburg
- (61) N.N.: Mit kleinen Schritten voran, in: Ensorga-Magazin/Entsorgungswirtschaft, Heft 9/86, S. 12 ff
- (62) N.N.: PET-Einweg-Flaschen ohne Aldi, in: Umwelttechnik 6/87, S. 5
- (63) N.N.: PVC unter Anklage, Der Tagesspiegel v. 03.03.88
- (64) N.N.: Rücknahme und Pfandregelung für Kunststoffflaschen, in: Müll & Abfall 4/88, S. 175
- (65) Oppermann, M.: Entwicklung eines Recyclingverfahrens zur direkten Wiederverwertung von Duroplastabfällen, BMFT-Forschungsbericht T 83-302, 1983
- (66) Peters, H.: Die Wand des Behälters besteht aus sechs Schichten verschiedener Werkstoffe, in: Handelsblatt v. 29.04.87
- (67) Projsnar: Recycling von Polyurethanabfällen unter Einbeziehung der Alkoholysereaktion, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling Berlin 1979, EF Verlag, Berlin 1979
- (68) Fa. Rehau: Persönliche Mitteilung
- (69) Ropertz, G.: Wirtschaftliche Kunststoffrückgewinnung aus kommunalen und industriellen Abfällen, Aufbereitungs-Technik, Heft 9/86, S. 489 - 494
- (70) Scheffold, K.: Getrennte Sammlung und Kompostierung, EF Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin 1985
- (71) Schönborn, H.: Verwertbarkeit von Kunststoffen; in: Konzepte zur Gewinnung von Wertstoffen aus Hausmüll, 9. Mülltechnisches Seminar TU München 1986
- (72) Schwarz, O. et al.: Kunststoffverarbeitung, 3. Aufl. Vogel-Buchverlag, Würzburg 1985
- (73) Shin, K.C.: Recycling von Kunststoffen, wlb 11/80, S. 34 ff.
- (74) Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch 1986 für die Bundesrepublik Deutschland, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart/Mainz 1986
- (75) Statistisches Bundesamt: Produktion im Produzierenden Gewerbe des In- und Auslandes 1986 (Fachserie 4, Reihe 3.1)
- (76) Steiner, K.W.: Neue Wege in der Wiederverwertung von Kunststoffen außerhalb der geübten Regranulierpraxis, in Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Recycling International, EF Verlag, Berlin 1984, S. 646
- (77) Steinert, H.: Hitze läutert Kunststoff-Schrott, VDI-Nachrichten v. 29.05.87
- (78) Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Pyrolyse von Abfällen, EF Verlag, Berlin 1985
- (79) Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Käufer, H. (Hrsg.): Recycling von Kunststoffen 1, EF Verlag, Berlin 1987
- (80) Umweltbundesamt: Daten zur Umwelt 1986/87, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1986

(81) VDI- Gesellschaft Kunststofftechnik (Hrsg.): Aufbereiten von Kunststoffabfällen, VDI-Verlag, Düsseldorf 1973
(82) VKE: Diverse Informationsblätter
(83) Werth, P: Produktinnovationen in der Sekundärrohstoffwirtschaft am Beispiel von Berlin (West), Ergebnisbericht der Vorphase, Alba GmbH & Co KG, Berlin 1987

(84) Werth, P.; Heinemann, M.: Verwertungsmöglichkeiten von gemischten Kunststoffen, in: Thomé-Kozmiensky, K.-J. (Hrsg.): Materialrecycling durch Abfallaufbereitung, EF Verlag, Berlin 1983, S. 606 ff.

(85) Wirsing, G.: Biokunststoff kommt in Marktnähe, VDI-Nachrichten 34/21.08.87, S. 22



Specialists in innovative plastics recycling

reko EP Development, manufacture and marketing of quality plastic products for various branches of industry.

rehas Reliable standard or tailor-made quality regranulates/compounds for the plastics processing industry; trading activities complete its wide programme in PE, PP, PS and ABS.

re>tech Specializing in Engineering Plastics, Re-tech developed the "Feasible Recycling Formula" for high quality recycling of PET bottles; it offers its technology world-wide

rekoPearl In soil irrigation systems, based on porous hose made of rubber and polyolefins

Reko b.v. forms part of **DSM**, a chemical group whose fields of activity include polymers and plastics processing.

For more information:



reko b.v.
P.O. Box 191 6190 AD Beek(L)
Holland tel: 31-4490-76060
fax: 31-4490-79512 telex: 56230



Wir suchen laufend sortenreine Abfälle, NT-Ware und Mahlgut

CA, CAB, CP, PC, ABS

Wir bieten an:

Regenerat und Mahlgut
obengenannter Kunststoffe

Plastex

Postanschrift: Kazmaistr. 39
8000 München 2
Telefon 089/5025285

intecus

EILIG ----- VERTRAULICH ----- GRÜNDLICH

Unser Wissen - Ihr Vorteil

Ingenieurgesellschaft für technischen Umweltschutz

* Sachverständigengutachten

* Beratung und Planung im Bereich:
- Umweltschutztechnologie
- Abfallbehandlung
- Entsorgung

* Mess- und Analysetechnik

Dr.-Ing. B. Billtewski Dipl.-Ing. G. Härdtle Dipl.-Ing. K. Marek
Krefelder Str. 20 · 1000 Berlin 21 · Tel. 030/392 20 97-98 · Telex 182 981 mtra d

**Müll
und
Abfall**

**Fachzeitschrift für Behandlung
und Beseitigung von Abfällen**
**Organ für die gesamte Entsor-
gung und Abfallwirtschaft**

*Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)
– Mitteilungen des Arbeitskreises für die Nutzbarmachung
von Siedlungsabfällen e.V. (ANS)*

Schriftleitung: Dipl.-Ing. M. Ferber

Erscheinungsweise: Monatlich mit je etwa 30 Seiten, DIN A4

Eine Fachzeitschrift von Fachleuten für Fachleute ist angesichts der anstehenden Fragen und Probleme in der Abfallwirtschaft mehr denn je von Interesse:

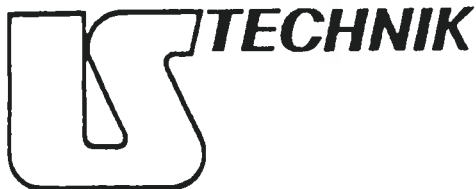
MÜLL und ABFALL bietet den umfassenden Erfahrungsaustausch zwischen allen in der Praxis an der Entsorgung und Abfallwirtschaft beteiligten Kreisen.

Die Mitarbeit von Experten aus Forschung, Industrie, Verwaltung und Organisationen, aber auch aus der kommunalen und aus der privatwirtschaftlichen Praxis vor Ort, gibt die Gewähr für die ausgewogene und fundierte Berichterstattung und das hohe Niveau der aktuellen Beiträge.

Als von Interessengruppen unabhängige, kritische und verantwortungsbewußte Fachzeitschrift ist **MÜLL und ABFALL** die unentbehrliche Informations- und Arbeitsgrundlage für alle in diesem Bereich tätigen Ingenieure und Kaufleute, Wissenschaftler und Praktiker, Juristen und Verwaltungsfachleute.



Erich Schmidt Verlag
Berlin · Bielefeld · München



LORENZ SCHLÖGL

A-2563 Pottenstein, Wehrgasse 6
Tel.: (02672) 24 19, Telex: 1 44 69

RECYCLINGANLAGEN FÜR ABFALL-POLYSTYROL-SCHÄUME

Verschiedene Zerkleinerungsanlagen für eine kostengünstige, umweltschonende Wiederverwendung als Verpackungsmaterial, zur Bodenauflockerung, Herstellung von Dämmplatten, Ziegeln, Isolierputz usw.



ABFALLVERWERTUNG
Systeme aus einer Hand

Ihr Problem:

Kunststoffabfälle

aus Produktion
Gewerbe
Hausmüll

Wir haben:

**Die Kunststoff-
Verwertungsanlage Typ ET/1**

Unser Kontakt macht's:

REAL GmbH

Gartenweg 3 Tel. (09323) 35 25
8717 Mainbernheim Telex 689375

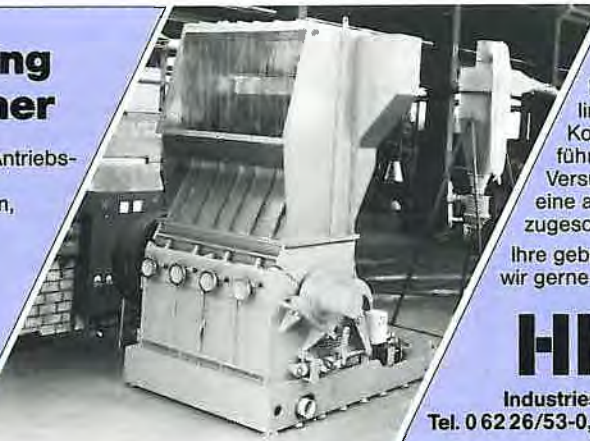
HANSA- KUNSTSTOFF- RECYCLING

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

Waldhofstraße 5 · 2087 ELLERBEK
☎ 04101/33031-32 · Tx 2182019 gesa d

Kunststoffrecycling Wir sind Ihr Partner

- Schneidmühlen mit 11 bis 160 kW Antriebsleistung (s. Foto)
- Vorzerkleinerungsanlagen für Ballen, sperrige Hohlkörper usw.
- Waschanlagen für verschmutzte Kunststoffe (z. B. Landwirtschaftsfolie)
- Trennanlagen für vermischte Kunststoffe (z. B. Folien aus dem Hausmüll)
- Komplette, maßgeschneiderte Problemlösungen



**Das Herbold-Konzept:
Maschinen nach Maß**

Beschreiben Sie uns Ihr Recycling- oder Aufbereitungsproblem. Kostenlos und unverbindlich führen wir mit Ihrem Material Versuche durch und entwickeln eine auf Ihre Anforderungen zugeschnittene Lösung.

Ihre gebrauchte Maschine nehmen wir gerne in Zahlung.

HERBOLD

Industriestraße 23, D-6922 Meckesheim
Tel. 0 62 26/53-0, Tx. 4 66 524, Fax 0 62 26/53 59

SIKOPLAST

MASCHINENBAU GmbH

**Ihr
Partner in
Recycling-
Fragen**



SIKOPLAST Maschinenbau · Heinrich Koch GmbH

Jakobstr. 84-88 · 5200 Siegburg · Telefon 02241 / 6 41 94 · Telex 889 473 siko-d · Telefax 02241 / 5 24 54

NEU



Umweltbundesamt

2., durchgesehene Auflage

Daten zur Umwelt 1986/87

2., durchgesehene Auflage, 550 Seiten
incl. 4 Ausschlagtafeln, 221 Abbildungen, davon 125
Abbildungen 4farbig, DIN A 4, kartoniert, ISBN 3 503 02649 5

DM 24,-

- Wo befinden sich in der Bundesrepublik Deutschland Kraftwerke, Flugplätze, Deponien oder andere umweltbelastende Einrichtungen?
- Wie stellt sich die Belastung von Luft, Wasser und Boden dar?
- Welchen Lärmbelastungen ist der Einzelne ausgesetzt?
- Welche Schadstoffquellen sind für die Belastung der Umwelt verantwortlich?
- Wo liegen die Ursachen für die vielfältigen Umweltbelastungen?
- Welche Folgen sind mit den Belastungen für die Flora und Fauna oder die Nahrungsaufnahme des Menschen verbunden?
- Welche Maßnahmen wurden zum Schutz der Umwelt eingeleitet, welche Instrumente eingesetzt?

Von Altlasten bis zu Waldschäden, von der Abgasentschwefelung bis zur radioaktiven Belastung, von der Gewässergüte bis zu den Smogkarten: Diese Datenzusammenstellung liefert zu jeder wichtigen umweltrelevanten Frage das richtige Material.

Daten zur Umwelt 1986/87 ist ein MUSS für jeden, der sich fundiert mit Fragen des Umweltschutzes auseinandersetzen will und muß.

A 588



Erich Schmidt Verlag · Berlin

KaJo Kunststoffe Jörg Stieghofer

D-3457 Deensen/W. Germany

Bahnhofstr. 25 · Tel. (0 55 32) 0 53 53 · Telex 965 383 kajo d

FAX (05532) - 4866

Wir entsorgen Ihre Kunststoffabfälle
(PVC – PE – PS – PP – PC – ABS)
schnell, kostengünstig, bundesweit.

Eigene Fertigung von Profilen aus Recyclingmaterial.
Extrusion und Spritzgießen.

MITTEILUNGEN DER
LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA)

13

Informationsschrift Verwertung von festen Siedlungsabfällen

LAGA-Arbeitsgruppe: Hausmüllverwertung

Stand: 9/1987

59 Seiten, DIN A 5, Einzelpreis DM 13,80. Staffelpreise: ab 5 Expl. DM 11,20; ab 10 Expl. DM 10,55; ab 25 Expl. DM 10,15; ab 50 Expl. DM 9,70 je Expl. ISBN 3 503 02730 0

Die Informationsschrift wurde als Entscheidungshilfe für die zur Abfallentsorgung Verpflichteten aufgestellt. Sie gibt Hinweise für die zuständigen Fachbehörden und andere interessierte Kreise.

Erich Schmidt Verlag · Berlin · Bielefeld · München

Müll- und Abfallbeseitigung

Handbuch über die Sammlung, Beseitigung und Verwertung von Abfällen aus Haushaltungen, Gemeinden und Wirtschaft

– Müll-Handbuch –

Begründet auf Anregung des Bundesministers für Gesundheitswesen von Professor Dr.-Ing. E. h. W. Kumpf †, Ministerialrat a. D., Lt. Reg.-Dir. a. D. K. Maas † und Prof. Dr.-Ing. H. Straub †, Stadtbaudirektor a. D.

Herausgegeben von Prof. Dr. med. habil. G. Hösel, Ministerialdirigent a. D. und Erster Direktor und Professor beim Umweltbundesamt Dipl.-Ing. W. Schenkel, unter Mitwirkung in- und ausländischer Fachleute aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft

Ergänzbare Ausgabe, rd. 7.500 Seiten, DIN A 5, einschließlich 5 Spezialordner DM 386,-. Ergänzungen von Fall zu Fall, Seitenpreis ca. DM 0,35.

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 mehr als 20 Jahren seine Eignung unter Beweis gestellt hat und heute aktueller und wichtiger als je zuvor ist:

Aus dem Inhalt:

Rechts- und Verwaltungsvorschriften; Merkblätter

Menge und Zusammensetzung, physikalisch-chemische Untersuchungen (Abfallanalytik)

Sammlung und Transport

Verwertung (getrennte Sammlung/mechanische Sortierung)

Behandlung und Beseitigung von Schlämmen und Altöl

Deponie (Planung, Betrieb, Rekultivierung)

Hygiene

Kompostierung

Müllverbrennung

Gewerbeabfälle (Sammlung, Behandlung, Verwertung, Ablagerung)

Sonderabfälle (z. B. Autowracks und Altreifen, Kunststoffe, Krankenhaus- und Pharmaabfälle, Produktionsrückstände, Bauschutt)

Das Müll-Handbuch

Das gesamte know-how der Abfallwirtschaft, angefangen von Kriterien für die Auswahl von Müllfahrzeugen bis hin zu Beseitigungsmethoden PCB-haltiger Abfälle, wurde von über 120 namhaften Mitarbeitern für dieses Standardwerk zusammengetragen. Unternehmen mit nach Art oder Menge problematischen Abfällen und öffentliche wie private Beseitigungsbetriebe und Anlagenbetreiber benutzen das Müll-Handbuch seit langem zur Bewältigung der sich ständig ändernden Aufgaben. Behörden und Ämtern im Bundes-, Landes- und kommunalen Bereich ebenso wie öffentlichen und privaten Forschungsinstituten sowie Ingenieurbüros dient das Handbuch als ständige Informationsquelle.



Erich Schmidt Verlag
Berlin · Bielefeld · München