



**Montanuniversität Leoben**  
**Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik**

Institutsvorstand: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl E. Lorber



## **Diplomarbeit**

# Stand der Technik im Bereich der Verwertung und des Recyclings von Kunststoffen in der Automobilindustrie

erstellt am

**Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik (IED)**

**Montanuniversität Leoben**

**Vorgelegt von:**

Diether Kohlenbrein, 9135230  
Ziernfeldgasse 10  
8700 Leoben

**Betreuer:**

O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Karl E. Lorber  
Mag. Dr. Michael Hofer

Leoben, 2000-11-05



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 Problemstellung .....	5
1.2 Zielsetzung .....	7
<b>2 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN.....</b>	<b>8</b>
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen in Österreich.....	8
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen in der EU .....	11
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen in anderen Ländern .....	12
2.3.1 Deutschland.....	12
2.3.2 Niederlande .....	15
2.3.3 Schweden.....	15
2.3.4 Schweiz .....	15
2.3.5 Japan und USA .....	16
<b>3 MATERIALSTRÖME AUS DER AUTODEMONTAGE .....</b>	<b>17</b>
3.1 Betriebsflüssigkeiten .....	18
3.2 Demontagereihenfolge.....	19
<b>4 KUNSTSTOFFE.....</b>	<b>22</b>
4.1 Herstellung.....	23
4.1.1 Polymerisation .....	23
4.1.2 Polykondensation .....	24
4.1.3 Polyaddition .....	24
4.2 Verwendung.....	25
4.2.1 Thermoplaste.....	25
4.2.2 Elastomere .....	27
4.2.3 Duroplaste .....	27
<b>5 VERWERTUNGSSTRATEGIEN FÜR KUNSTSTOFFE AUS DER AUTODEMONTAGE.....</b>	<b>29</b>
5.1 Werkstoffliches Recycling .....	35

5.1.1	Thermoplaste.....	36
5.1.2	Versuchs/Projektergebnisse.....	39
5.1.2.1	Polyethylen PE.....	41
5.1.2.2	Polypropylen PP.....	43
5.1.2.3	Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS.....	44
5.1.2.4	Polyamid PA.....	47
5.1.2.5	Polymethylmetacrylat PMMA.....	50
5.1.3	Duroplaste.....	52
5.1.4	Versuchs/Projektergebnisse.....	52
5.1.4.1	PUR-Weichschaumstoffe.....	53
5.1.4.2	RIM-Polyurethane.....	56
5.1.4.3	Glasfaserverstärkte Kunststoffe.....	59
5.1.5	Elastomere.....	62
5.1.6	Versuchs/Projektergebnisse.....	62
5.1.6.1	Altgummi als Füllstoff:.....	62
5.1.6.2	Formmassen aus Gummigranulat und Bindemittel.....	63
5.2	Rohstoffliches Recycling.....	64
5.2.1	Mechanische Aufbereitung.....	64
5.2.2	Thermochemische Vorbehandlung.....	65
5.2.2.1	Visbreaking.....	66
5.2.2.2	Niedertemperatur-Pyrolyse.....	66
5.2.2.3	Thermischer Abbau in Rührkesselreaktoren.....	67
5.2.2.4	Thermischer Abbau in Schneckenreaktoren.....	67
5.2.3	Chemische Konversionsprozesse.....	69
5.2.3.1	Hydrierung.....	69
5.2.3.2	Pyrolyse/Coking.....	70
5.2.3.3	Cracking.....	72
5.2.3.4	Vergasung.....	73
5.2.3.5	Verwertung von Kunststoffen im Hochofenprozeß.....	75
5.3	Energetische Nutzung.....	76
5.3.1	Müllverbrennungsanlagen.....	77
5.3.2	Kraftwerksfeuerungen (Wirbelschicht).....	80
5.3.3	Zementöfen.....	81
5.3.4	Verbrennung unter reinem Sauerstoff.....	83

---

<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK.....</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>89</b>
7.1	Literatur.....	89
7.2	Verwendete Abkürzungen/Begriffe .....	92
7.3	Tabellen .....	97
7.4	Abbildungen.....	98

# 1 Einleitung

Die Fahrzeugindustrie ist einer der größten Wirtschaftszweige dieser Welt. Derzeit hängt weltweit jeder fünfte Arbeitsplatz direkt oder indirekt von der Produktion, dem Vertrieb der Nutzung und der Entsorgung von Fahrzeugen ab [1, S.18].

Lange Zeit hat man der Entsorgung von Altfahrzeugen keine wesentliche Bedeutung zugemessen. Aufgrund der zunehmenden Mobilität der Gesellschaft wird die zu entsorgende Menge an Altfahrzeugen von Jahr zu Jahr größer. Derzeit werden weltweit 18 bis 24 Millionen Fahrzeuge pro Jahr aus dem Verkehr genommen, in der EU zwischen 6,5 und 12 Millionen, in den USA zwischen 9 und 10 Millionen und in Japan ca. 1,1 Millionen [2]. In Österreich sind im Jahr 1999 rund 191.000 Kraftfahrzeuge aus dem Bestand ausgeschieden worden. Diese Stückzahl beinhaltet die zur Entsorgung anfallenden Alt-PKW, die zur Weiterverwendung im Ausland bestimmten Gebrauch-PKW sowie gestohlene PKW (rund 2.800 Stück im Jahr 1999) [3].

Bei einem ausgedienten Kraftfahrzeug werden in der Regel wieder- und weiterverwendbare Teile wie Motoren, Getriebe, Kühler usw. demontiert. Ebenso werden Teile wie Batterien, Katalysatoren und Kunststoffteile ausgebaut und an entsprechende Aufarbeitungsfirmen weitergeleitet. Mittlerweile erfolgt in vielen Betrieben ebenfalls die Entnahme und Entsorgung der Betriebsflüssigkeiten (Kraftstoff, Motor- und Getriebeöl, Bremsflüssigkeit, Kühlmittel). Nachdem alle wieder- und weiterverwendbaren Teile entfernt worden sind, wird der Rest der Karosserie in einer Shredderanlage zerkleinert und in nachgeschalteten Trennprozessen sortiert. Die einzelnen Metalle werden dabei größtenteils wiedergewonnen und dienen als Sekundärrohstoffe für Stahl- und Umschmelzwerke.

Nach Angaben der Industrie werden heutzutage 75 - 80 % der Fahrzeuggesamtmasse bereits wiederverwertet [2, S. 1]. Die verbleibenden Rückstände werden auf Deponien abgelagert.

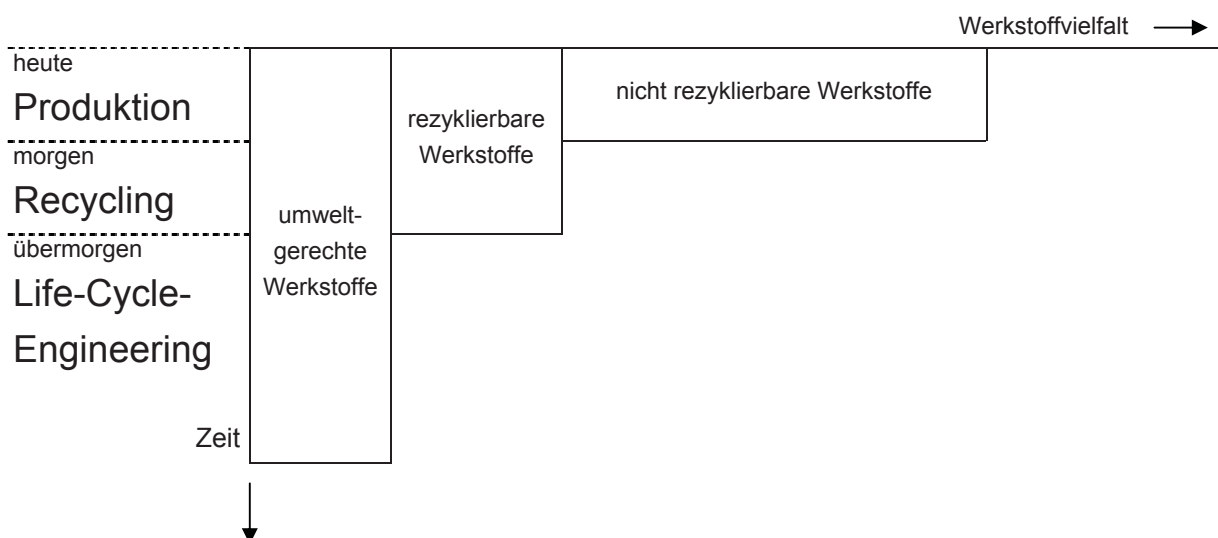
## 1.1 Problemstellung

An ein modernes Fahrzeug wird eine Vielzahl von Anforderungen wie z.B. Sicherheit, Fahrverhalten, Optik, Komfort etc. gestellt. Zur Erfüllung dieser Anforderungen kommen die unterschiedlichsten Werkstoffe wie Aluminium, Stahl, Kunststoff, Glas oder Textilien zum Einsatz. In den letzten Jahren ist eine zunehmende Verschiebung der Werkstoffzusammensetzung weg vom Stahl und hin zu immer leichteren Materialien, insbesondere Aluminium und Kunststoffen festzustellen. Diese Entwicklung wird jedoch zunehmend kritischer betrachtet, insbesondere deswegen, da der Großteil der nichtmetallischen Werkstoffe wie Kunststoffe, Lackreste und Glas deponiert werden muß.

In der Europäischen Union wird zur Zeit an einer EU-Altautoverordnung gearbeitet [37]. Dieser Entwurf beinhaltet die Forderung einer Altautoverwertung von mindestens 95 Gew.-% und ein stoffliches Recycling von mindestens 85 Gew.-% bis zum Jahr 2015.

Zur Erfüllung dieser Richtlinien bieten sich stoffliche, rohstoffliche und thermische Verfahren an, mit deren Hilfe die Abfälle verwertet bzw. behandelt werden können. Stoffliche und rohstoffliche Verfahren bedingen die Demontage verwertbarer Bauteile und –gruppen. Die Demontierbarkeit muß bereits in der Konstruktionsphase festgelegt werden.

Die Fahrzeugkonstruktion wird in Zukunft drei gleichzeitig zu beschreitende Wege verfolgen: Diese sind die zerlegerfreundliche Baustruktur, schnell lösbare Verbindungstechniken und recyclinggerechte Werkstoffwahl. Der Verzicht auf nicht oder schwer rezyklierbare Werkstoffe oder der Einsatz von nur wenigen verschiedenen Kunststoffsorten, die wiederum leicht rezykliert werden können wird zunehmend forciert (vgl. Abbildung 1.1 [15, S. 13]).



**Abbildung 1.1 Verringerung der Werkstoffvielfalt**

Da in den vergangenen Jahren eine Vielzahl an verschiedenen Kunststoffen im Fahrzeugbau eingesetzt wurden, viele davon jedoch nur schwer oder überhaupt nicht rezyklierbar sind, wird zur Zeit, laut diverser Fahrzeughersteller, nur ein Anteil von 13 bis 15 %

wiederverwertet. Als Beispiel ist in Abbildung 1.2 der Rezyklateinsatz bei verschiedenen BMW Modellreihen dargestellt.

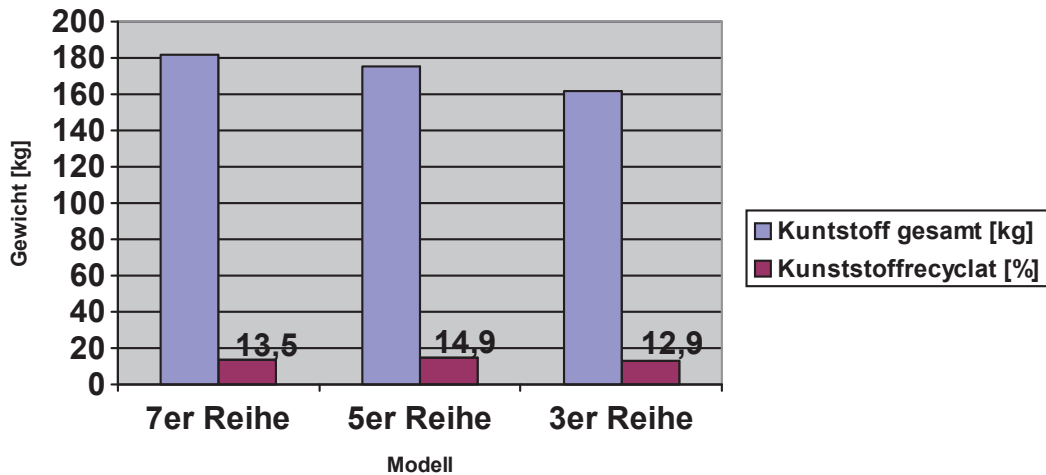


Abbildung 1.2 Rezyklateinsatz in den BMW Modellreihen [1, S. 263]

Abbildung 1.3 zeigt am Beispiel der aktuellen BMW 3er Reihe, welche Arten und Mengen an Kunststoffen eingesetzt werden (verwendete Abkürzungen siehe Kapitel 4 - Kunststoffe). Der Gesamtanteil an Kunststoff beträgt 162 kg. Dies entspricht 11,6% des Fahrzeuggesamtgewichtes von 1394 kg. Davon sind 64,6% der Kunststoffe in der Karosserie, 16,6% in der Elektronik und Elektrik, 9,6% im Fahrwerk und 9,2% im Antrieb implementiert.

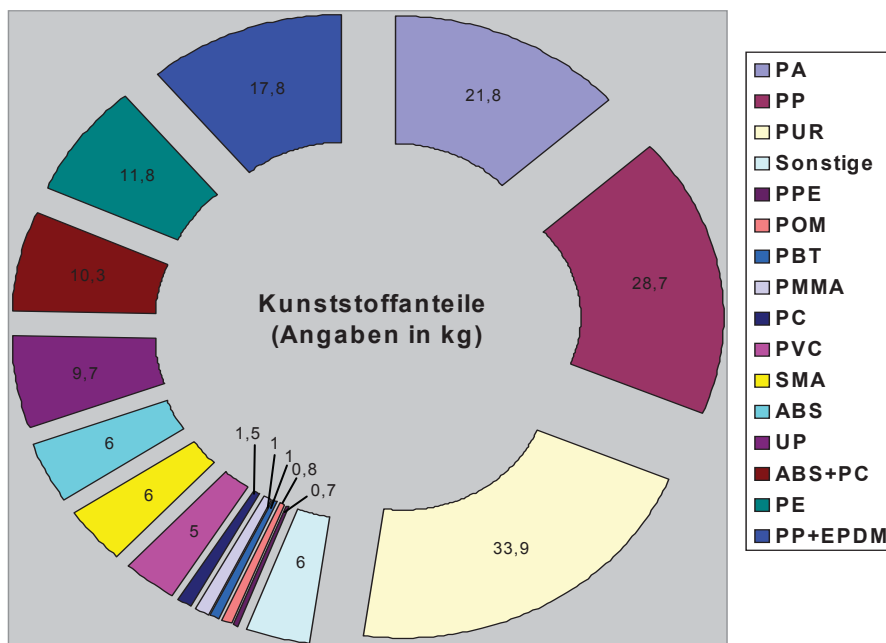


Abbildung 1.3 Kunststoffeinsatz in der BMW 3er Reihe (328i), Baujahr 1998 [4, S. 249]



## 1.2 Zielsetzung

In Zukunft wird die Fahrzeugindustrie vermehrt darauf achten müssen, hauptsächlich recyclingfreundliche Werkstoffe einzusetzen. Weiters müssen Fahrzeuge von Anfang an so konstruiert werden, daß nach der Nutzungsphase der Fahrzeuge eine problemlose Demontage von sortenreinen Werkstoffen möglich ist. Aus dieser Gegebenheit heraus, wurden die Ziele der vorliegenden Diplomarbeit abgeleitet.

- Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich, Europa und anderen Ländern in Bezug auf die Entsorgung von Altfahrzeugen.
- Darlegung der Stoffflüsse in und aus einem Fahrzeug, wobei die Kunststoffteile näher betrachtet werden.
- Aufzeigen des Stands der Technik im Bereich der Verwertung von Kunststoffen.
- Darstellung, welche Anforderungen an eine Verwertung von Kunststoffen gestellt werden müssen, um in Zukunft die Verwertungs- und Verwendungsquoten steigern zu können.

## 2 Rechtliche Rahmenbedingungen

### 2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen in Österreich

Seit 1. Juli 1990 ist in Österreich das Abfallwirtschaftsgesetz des Bundes (AWG) [5] in Kraft. Mittlerweile sind zehn Novellierungen des AWG erfolgt. Die letzte erfolgte mit dem BGBl. 1998/151.

Im § 1 des AWG sind die Ziele und Grundsätze der Österreichischen Abfallwirtschaft dargelegt. Demnach ist die Abfallwirtschaft danach auszurichten, daß:

- schädliche bzw. nachteilige Einwirkungen auf Menschen, aber auch auf Tiere und Pflanzen so gering wie möglich gehalten werden
- Rohstoff und Energiereserven geschont werden
- der Verbrauch an Deponievolumen so gering wie möglich gehalten wird
- nur solche Stoffe als Abfälle zurückbleiben, deren Ablagerung kein Gefährdungspotential für nachfolgende Generationen darstellt. Dieser Grundsatz entspricht dem in der Umweltpolitik häufig genannten „Vorsorgeprinzip“.

Die Grundsätze dieses Gesetzes werden im § 1 Abs. 2 dargelegt, und orientieren sich dabei an der Abfallvermeidung, Abfallverwertung und Abfallentsorgung.

- Die Abfallmengen und deren Schadstoffgehalt sind so gering wie möglich zu halten (Abfallvermeidung).
- Die Verwertung hat im Sinne des § 1 Abs. 2 Z. 2 zu erfolgen. Demnach sind Abfälle stofflich oder thermisch zu verwerten:
  - soweit dies ökologisch vorteilhaft und technisch möglich ist;
  - die dabei entstehenden Mehrkosten im Vergleich zu anderen Verfahren der Abfallbehandlung nicht unverhältnismäßig sind;
  - ein Markt für die gewonnenen Stoffe oder die gewonnene Energie vorhanden ist oder geschaffen werden kann.
- Abfälle die nicht verwertbar sind, sind je nach ihrer Beschaffenheit durch biologische, thermische oder chemisch-physikalische Verfahren zu behandeln. Feste Rückstände sind möglichst reaktionsarm und konditioniert geordnet abzulagern (Abfallentsorgung).

Des weiteren unterscheidet das AWG zwischen den Begriffen Abfall und Altstoff.

Abfall im Sinne des § 2 Abs. 1 sind bewegliche Sachen, deren sich der Eigentümer oder Inhaber entledigen will oder entledigt hat, oder bewegliche Sachen, deren Erfassung und Behandlung als Abfall im öffentlichen Interesse geboten ist.

Altstoffe sind laut § 2 Abs. 3 prinzipiell Abfälle, jedoch solche Abfälle, die sich grundsätzlich für eine Verwendung oder Verwertung eignen und nachweislich dafür vorgesehen sind.

Dies bedeutet, daß die zur Altstoffverwertung geeigneten Abfälle zunächst einmal grundsätzlich Abfälle im Sinne des AWG sind. Die Abfalleigenschaft verlieren solche Stoffe erst durch die tatsächliche Verwendung oder Verwertung als Altstoff. Zur Verwertung geeignete Abfälle behalten solange die Abfalleigenschaft, bis der oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe einer zulässigen Verwendung oder Verwertung zugeführt werden.

Gemäß dem Erlaß zum AWG vom 16.8.1995 - Pkt. 6 kann die Verwendung als „Wiederverwendung“ oder „Weiterverwendung“ verstanden werden [5, S.21].

Die „Wiederverwendung“ einer Sache ist der neuerliche bestimmungsgemäße Einsatz dieser Sache.

Eine „Weiterverwendung“ ist dann gegeben, wenn eine Sache zwar nicht bestimmungsgemäß, jedoch auf zulässige Art und Weise verwendet wird. Als Beispiel Altöle, die nicht mehr für ihren ursprünglichen Einsatz (Schmierzweck) verwendet werden können, jedoch in einer hierfür genehmigten Anlage verfeuert werden.

Unter dem Begriff „Verwertung“ wird die Behandlung von Abfällen verstanden, bei der die Gewinnung von Produkten oder Energie im Vordergrund steht. Der Begriff der Verwertung läßt sich in die stoffliche Verwertung und in die thermische Verwertung trennen:

Eine stoffliche Verwertung liegt dann vor, wenn ein Abfall unmittelbar zur Herstellung eines neuen Produktes eingesetzt wird bzw., wenn die aus einem Abfall gewonnenen Stoffe nachweislich eingesetzt werden. Bei einer stofflichen Verwertung muß ein nach dem Verwertungsvorgang gewonnener Stoff nachweislich einer zulässigen Verwendung zugeführt werden. Der gewonnene Stoff muß ein marktfähiges Produkt mit entsprechenden Qualitätsanforderungen darstellen. Wie zum Beispiel die Herstellung eines Granulats aus Kunststoffabfällen, das ohne weiteren Behandlungsschritt in der Kunststoffproduktion eingesetzt werden kann, stellt eine stoffliche Verwertung dar.

Bei der „thermischen Verwertung“ steht die Energiegewinnung sowie Energienutzung definierter Stoffe oder Stoffgruppen im Vordergrund (unmittelbarer Einsatz von Abfällen als Ersatz konventioneller Brennstoffe) [5, S. 22].

§ 10 des AWG beinhaltet die Altstoffverwertung und enthält zwei Eingriffsbefugnisse:

- Zum einen kann der Umweltminister im Einvernehmen mit dem Wirtschaftsminister die Verwertung bestimmter Altstoffanteile in Produktionsprozessen anordnen (§ 10 Abs. 1 AWG).
- Zum anderen kann der Umweltminister die getrennte Sammlung von bestimmten Abfällen anordnen, wenn dies nicht unverhältnismäßig ist. Dabei muß die getrennte Sammlung bestimmter Abfälle zur Erreichung der im Bundes-Abfallwirtschaftsplan aufgestellten Ziele erforderlich sein.

Bisher hat der Umweltminister von den im § 10 ermöglichten Kompetenzen keinen Gebrauch gemacht. Es gibt jedoch freiwillige Vereinbarungen zwischen den betroffenen Wirtschaftskreisen und dem Umweltministerium gemeinsam mit dem Wirtschaftsministerium, die im wesentlichen auf die Inhalte des § 10 ausgerichtet sind. Als Beispiel sei die freiwillige Vereinbarung über die Verwendung von gebrauchten Personen- und Kombinationskraftwagen (Alt-PKW-Vereinbarung) genannt.

Das Entsorgen oder Ablagern von Schredderabfällen auf neuen Deponien ist durch die Deponieverordnung (BGBl. Nr. 164/1996) seit 1.1.1997 verboten, da der Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff im Schredderabfall (insbesondere in der Leichtfraktion) den Grenzwert von 5 Massenprozent überschreitet. Auch kann eine mechanisch-biologische Behandlung eine Unterschreitung des gesetzlich geforderten Brennwertes von 6000 kJ/kg Trockensubstanz nicht sicherstellen [5, S. 70].

Die Bewilligung des Deponierens auf Altdeponien ist durch die am 1.7.1997 in Kraft getretene Novelle zum Wasserrechtsgesetz bis 1.1.2004 begrenzt. Durch das Altlastensanierungsgesetz (BGBl. Nr. 63/1996) wird im Falle einer Deponierung für derartige Abfälle der Altlastenbeitrag von derzeit öS 400 (seit 1.1.1999) auf mindestens öS 600 pro Tonne ab 1.1.2001 angehoben.

## 2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen in der EU

Ende 1991 wurde von der Europäischen Kommission die Arbeitsgruppe „end of life vehicles“ mit dem Ziel eingerichtet, eine europaeinheitliche Rechtsgrundlage für das Fahrzeugrecycling zu schaffen [6, S. 17]. Am 9. Juli 1997 stand der erste Entwurf für eine europäische Altautorichtlinie, der „End-of-Life Vehicles (ELV) Directive“ [37].

### Richtlinienentwurf

Der aktuelle Richtlinienentwurf „ELV“ über Altfahrzeuge sieht folgendes vor:

- Abfallvermeidung:
  - Designanforderungen an Produzenten
    - Reduktion der Verwendung gefährlicher Substanzen
    - Design für Wiederverwendung und Recycling
    - Verwendung steigender Mengen an Sekundärmaterialien
  - Stoffverbote (Pb, Hg, Cd, sechswertiges Cr)
- Kostenlose Rücknahme durch zugelassene Verwertungsanlagen (Verwertungsnachweis)
- Behandlungspflichten
  - Entfernung gefährlicher Werkstoffe und Bauteile
  - Recycling- und wiederverwendungsgerechte Zerlegung und Lagerung
  - Entfernung von Reifen, Stoßstangen, Armaturenbrettern, Flüssigkeitsbehältern etc.
- Verwertungspflichten
  - Wiederverwendbare Teile sollen wiederverwendet werden
  - Nicht wiederverwendbare Teile sollen bevorzugt stofflich verwertet werden
- Zielvorgaben in % des durchschnittlichen Fahrzeuggewichtes (vgl. Tabelle 2.1)
  - 1.1.2006
    - Wiederverwendung/Verwertung: mindestens 85%
    - Stoffliches Recycling: mindestens 80%
  - 1.1.2015
    - Wiederverwendung/Verwertung: mindestens 95%
    - Stoffliches Recycling: mindestens 85%

**Tabelle 2.1 Zielvorgaben der Europäischen Autorichtlinie**

	JAHR	
	2006	2015
<b>stoffliches Recycling</b>	≥ 80%	≥ 85%
<b>thermische Nutzung</b>	≤ 5%	≤ 10%
<b>Wiederverwendung/ Verwertung</b>	≥ 85%	≥ 95%
<b>Deponie</b>	≤ 15%	≤ 5%

- Vorgaben für die Produktion von Neufahrzeugen  
-spätestens 2004  
mindestens zu 95% wiederverwendbar/verwertbar  
mindestens zu 85% wiederverwendbar/recyclingfähig
- Kennzeichnungspflichten und Demontagehandbücher  
Die Richtlinie umfaßt Fahrzeuge der Fahrzeugklasse M1, N1 sowie zwei- oder dreirädrige Kraftfahrzeuge. Die Fahrzeugklasse M1 betrifft Fahrzeuge zur Personenbeförderung, mit mindestens vier Rädern und höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz. Die Fahrzeugklasse N1 betrifft Kraftfahrzeuge für Güterbeförderung mit mindestens 4 Rädern und einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 t [7, S. 65].

## 2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen in anderen Ländern

### 2.3.1 Deutschland

Um die Menge und die Schädlichkeit von Abfällen aus der Automobilentsorgung zu reduzieren, haben in Deutschland betroffene Wirtschaftsverbände in einer „Freiwilligen Selbstverpflichtung“ vom 20.3.1997 Grundsätze zur umweltgerechten Altkarrosentsorgung festgelegt. Dieser kooperative Ansatz wird durch die Altkarrosverordnung (AltkarrosV) seit 1.4.1998 um einen ordnungsrechtlichen Rahmen ergänzt [7]. Darin kommt es vielfach zu Überschneidungen mit der Freiwilligen Selbstverpflichtung.

In der **Freiwilligen Selbstverpflichtung** verpflichten sich die Automobilindustrie und die beteiligten Wirtschaftszweige und Verbände, eine flächendeckende Infrastruktur zur Annahme und Verwertung von PKWs in Deutschland aufzubauen, Altautos umweltfreundlich zu entsorgen sowie die Verwertungsquoten für das Gesamtauto auf 95 % im Jahre 2015 zu steigern. Darüber hinaus verpflichten sich die Automobilhersteller und -importeure, Altautos ihrer Marke (Erstzulassung vor dem 1.4.1998) vom Letzthalter zu marktüblichen Konditionen zurückzunehmen, die Verwertungseigenschaften zu verbessern sowie Erzeugnisse, die nach Inkrafttreten des Verwertungsnachweises (d.h. nach Inkrafttreten der AltautoV am 1.4.1998) in den Verkehr gebracht wurden, unter näher angeführten Voraussetzungen kostenlos zurückzunehmen. Nicht hiervon erfaßt ist die Rücknahme von Altautos der Marken, die weder in Deutschland hergestellt noch nach Deutschland importiert und dort vertrieben werden. Dies betrifft bspw. Fahrzeuge, die direkt im Ausland erworben wurden. Die Freiwillige Selbstverpflichtung trifft bei der „Rücknahme zu marktüblichen Konditionen“ keine Aussage über die Preisgestaltung. Den Herstellern/Importeuren bleibt es somit freigestellt, mit den ihnen angeschlossenen Verwertungsbetrieben die Modalitäten der Kosten der Entsorgung zu vereinbaren.

Ergänzend zu diesen Selbstverpflichtungen der betroffenen Wirtschaftsverbände führt die **Altautoverordnung** Regelungen für Besitzer von Altautos sowie Betreiber von Annahmestellen, Verwertungsbetrieben und Anlagen zur weiteren Verwertung ein.

Nach § 3 Abs. 1 AltautoV ist der Letztbesitzer verpflichtet, sein Altauto einer anerkannten Annahmestelle oder aber direkt einem anerkannten Verwertungsbetrieb zu überlassen. Durch die Überlassung der Altautos an bestimmte Entsorgungseinrichtungen soll eine lückenlose umweltgerechte Entsorgung gewährleistet werden. Der Letztbesitzer erhält bei der Abgabe des Altautos einen Verwertungsnachweis, den er der Straßenverkehrszulassungsbehörde bei der endgültigen Stilllegung des Fahrzeugs vorzulegen hat. Der Verwertungsnachweis darf nur von einem anerkannten Verwertungsbetrieb (dieser kann auch im Ausland liegen) oder in dessen Auftrag von einer anerkannten Annahmestelle ausgestellt werden.

Die Verwertungsbetriebe haben die Altautos sodann umweltgerecht zu entsorgen. Für Annahmestellen und Verwertungsbetriebe bestehen Umweltschutzanforderungen, die im **Anhang zur AltautoV** festgelegt sind. Hier finden sich Anforderungen an den Betrieb bezüglich der Behandlung und Dokumentation von Altautos.

Es ist ausdrücklich festgelegt, daß Annahmestellen Altautos lediglich annehmen und erfassen, nicht jedoch behandeln dürfen [7, S. 78, Ziff.2.1.2]. Die Annahmestellen dienen also lediglich dazu, den Aufbau einer Umfassenden Infrastruktur für die Entgegennahme von Altautos zu erleichtern.

Bei den Anforderungen an Verwertungsbetriebe wird zwischen Vorbehandlung, Demontage und Wiederverwendung sowie Verwertung und Beseitigung unterschieden [7, S. 80, Ziff. 3.2.2 bis 3.2.4]. Im Bereich der Vorbehandlung sind zunächst sämtliche pyrotechnischen Bauteile sowie die Betriebsflüssigkeiten zu entfernen [7, S. 80, Ziff.3.2.2.1]. Es werden

bestimmte Bauteile festgelegt, die ab- oder ausgebaut werden sollen (große Kunststoffteile, Räder, Scheiben, Sitze) [7, S. 81, Ziff.3.2.3.3]. Die gewonnenen Bauteile und Stoffe sind vorrangig einer Wiederverwendung oder Verwertung zuzuführen [7, S. 81, Ziff.3.2.4.1]. Die Betreiber von Verwertungsbetrieben haben ein Betriebstagebuch über Erfassung, Trockenlegung, Demontage, Wiederverwendung, stofflicher und energietechnischer Verwertung, thermischer Behandlung und über den sonstigen Verbleib der Materialien und Stoffe zu führen [7, S. 81, Ziff.3.3.1]. Sämtliche ein- und ausgehenden Mengenströme sind mit den entsprechenden Unterlagen im Betriebstagebuch zu dokumentieren [7, S. 82, Ziff.3.3.2]. Darüber hinaus sind alle für den Betrieb der Anlage wesentlichen Daten festzuhalten [7, S. 82, Ziff.3.3.3]. Zudem ist ein Betriebshandbuch zu erstellen, das Bestimmungen über die Behandlung und Lagerung der Altautos sowie Arbeits- und Betriebsanweisungen enthält.

Recyclingquoten sind inhaltsgleich im Anhang der AltautoV und in der „Freiwilligen Selbstverpflichtung“ festgelegt. Während die Selbstverpflichtung allgemein Recyclingquoten zur Verwertung von Altautos festlegt, wird im Anhang der AltautoV zwischen Verwertungsbetrieben und Shredderanlagen differenziert.

Der Verwertungsbetrieb soll bis zum Jahre 2002 eine Verwertung bestimmter Bauteile/Materialien von mindestens 15 Gewichtsprozent bezogen auf das jeweilige Leergewicht eines Altautos erreichen [7, S. 81, Ziff.3.2.4.1].

Für den Shredderbetrieb, dem die Autos sodann nach einer eventuellen Vordemontage zur Entsorgung zugeführt werden, sollen die anfallenden Abfälle zur Deponierung bis zum Jahr 2002 nicht mehr als durchschnittlich 15 Gewichtsprozent und bis zum Jahr 2015 nicht mehr als durchschnittlich 5 Gewichtsprozent bezogen auf das jeweilige Leergewicht des Altautos betragen [7, S. 82, Ziff.4.1.2].

Dies kann künftig nur durch eine weitgehende Vordemontage und Entwicklung neuer Verwertungsverfahren erreicht werden. Hierzu ist es erforderlich, schon im Bereich der Produktion der Autos umweltgerechte Verfahren zu entwickeln und umweltgerechte Materialien zu verwenden. So werden von einigen Herstellerfirmen bereits heute in beträchtlichem Umfang Kunststoffrezyklate in der Produktion eingesetzt. Die AltautoV geht jedoch auf den Aspekt der Entwicklung einer recyclingorientierten Konstruktion nicht ein. Sie beschränkt sich auf die Festlegung von Standards zur umweltfreundlichen Entsorgung.

Zusammengefaßt sind die Schwerpunkte der 1998 in Kraft getretenen Altautoverordnung:

- Überlassungspflicht an lizenzierte Altautoverwerter
- Anforderungen an Annahmestellen, Verwertungsbetriebe und Anlagen zur weiteren Verwertung von Altautos
- Reduktion der nicht verwertbaren Abfälle auf weniger als 15% bis 2002 und auf weniger als 5% bis 2015



-Finanzierung durch Letztbesitzer in Zusammenhang mit Verwertungsnachweis / Verbleibserklärung als Voraussetzung für die Kfz-Abmeldung bei der Zulassungsstelle

### 2.3.2 Niederlande

Das niederländische Ministerium hat nach Antrag der Vereinigung der niederländischen Fahrrad- und Automobil-Industrie einem Altauto-Recyclingkonzept mit einer Recyclingabgabe von 250 Gulden pro Fahrzeug zugestimmt. Diese Abgabe wird seit dem 1. Jänner 1995 bei der Erstzulassung automatisch eingezogen. Somit wird über lizenzierte Betriebe der Auto Recycling Nederland (ARN) eine kostenlose Übernahme des Alt-PKW vom Letztbesitzer und ein ordnungsgemäßes Recycling gesichert.

Diese Abgabe dient auch für die Verwertung aller vor 1995 in den Niederlanden zugelassenen PKW [6, S. 18].

### 2.3.3 Schweden

Eine geordnete Altautoverwertung wird seit 1.1.1998 durch eine gesetzliche Regelung zur kostenlosen Rücknahme durch Importeur bzw. Hersteller sichergestellt. Als Voraussetzung für eine Entlassung aus der Steuer- und Versicherungspflicht ist für den Letztbesitzer eine Verwertungsbestätigung durch einen zertifizierten Schrottverwerter maßgebend. Für eine nachweisliche Alt-PKW-Verwertung erhält der Letztbesitzer einen bestimmten Betrag aus einem staatlich verwalteten Fond, der aus einer einmaligen Abgabe bei jedem Neuwagenkauf finanziert wird.

In den Bereichen Wiederverwendung und Verwertung sollen die Quoten 85% ab dem Jahr 2002 und mindestens 95% spätestens ab dem Jahre 2005 erreicht werden. Die Prozentsätze errechnen sich nach dem Betriebsgewicht des Altfahrzeuges und muß den Durchschnitt pro Hersteller darstellen. Als Hersteller gilt in Schweden wer Kraftfahrzeuge gewerblich herstellt oder gewerblich nach Schweden importiert [6, S.18].

### 2.3.4 Schweiz

Schweizer Automobilimporteure und Hersteller einigten sich pro verkauftem Neufahrzeug (PKW, Lkw, Busse) einen gewissen Geldbetrag für die umweltgerechte Entsorgung der Reststoffe aus Shredderanlagen (RESH) einzuzahlen. Zu diesem Zweck wurde 1992 unter der Federführung der VSAI (Vereinigung Schweizerischer Automobilimporteure) die IGEA-Stiftung gegründet. Seit 1.4.1997 werden pro verkauftem Neufahrzeug SRF 30 in die IGEA-Stiftung eingezahlt.

Weiters empfiehlt das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft den Kantonen die RESH-Verbrennung in Kehrlichtverbrennungsanlagen unter bestimmten Bedingungen (freie Kapazität, Einhaltung des Mischungsverhältnisses von max. 7,5% RESH, technische Ausrüstung der Anlage) zu genehmigen. Seit dem 1.2.1996 ist zwar gemäß „Technischer Verordnung über Abfälle (TVA)“ das Deponieren von Schredderabfall in der Schweiz verboten, doch konnte bis heute eine definitive Entsorgung zu diesem Thema nicht verwirklicht werden.

Die Rücknahme- und die Ablieferungspflicht für Alt-PKW. wird durch das Umweltschutzgesetz (USG) geregelt [6, S.18].

### **2.3.5 Japan und USA**

Auch hier steigen die Deponiepreise und Umweltprobleme. Dennoch sind keine gesetzlichen Regelungen für die Altautoentsorgung vorhanden oder geplant. Die Firmen Chrysler, General Motors und Ford haben sich in der USA lediglich zu einer „Informellen Arbeitsgruppe“ bezüglich dieses Themas zusammengeschlossen.

In Japan richtet die Regierung lediglich unverbindliche Appelle an die Autoindustrie sensibler mit dem Abfallproblem umzugehen. Circa 70% des Abfalls wird in Japan verbrannt, und es ist damit zu rechnen, das hier auch in weiterer Zukunft auf die thermische Behandlung von Abfallstoffen gesetzt wird.

### 3 Materialströme aus der Autodemontage

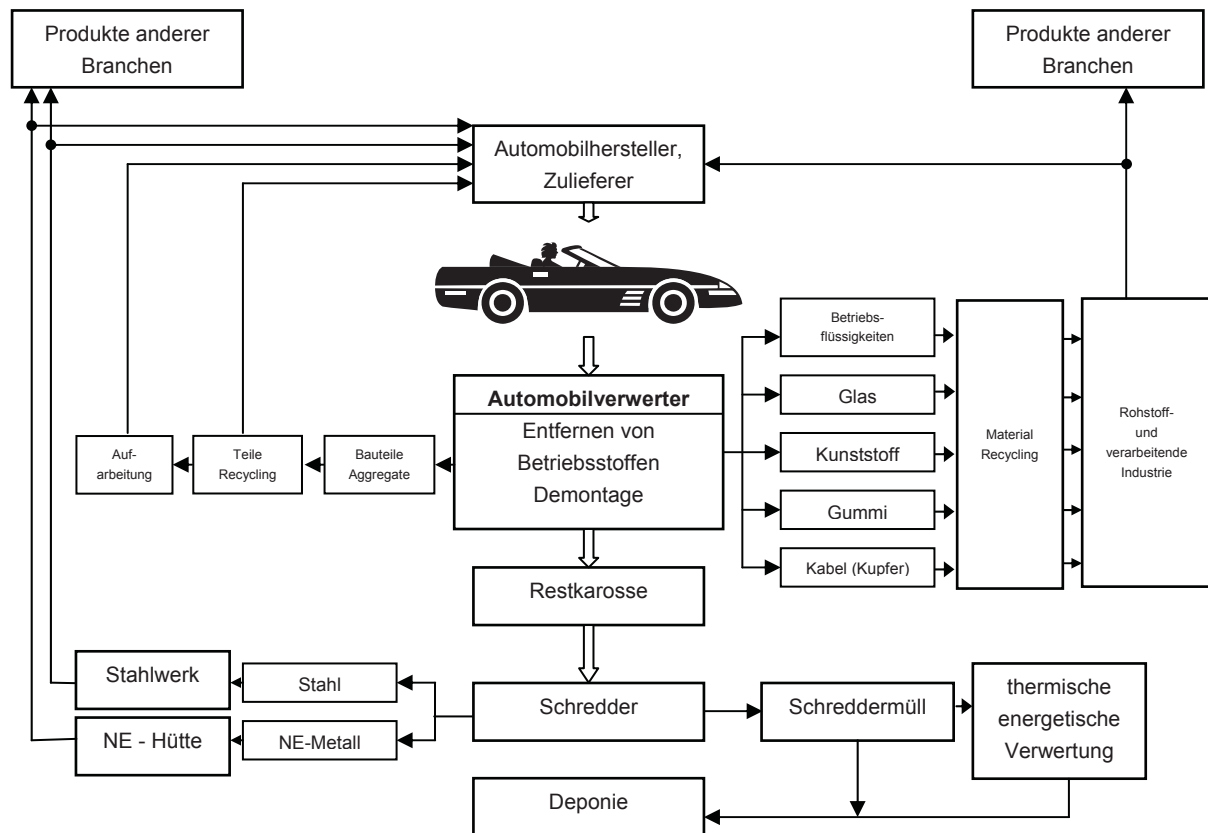
In den letzten Jahren ist eine starke Verschiebung der durchschnittlichen Materialzusammensetzung von Autos in Richtung von mehr Aluminium und Kunststoffen, bei entsprechender Reduzierung von Stahl, zu verzeichnen. Die wesentlichste Einflußgröße für die weitere Optimierung der künftigen PKW-Bauweise ist die angestrebte Treibstoffeinsparung durch Gewichtsreduktion, unter Beibehaltung der von Konsumenten geforderten Niveaus an Komfort und Sicherheit.

Tabelle 3.1 zeigt deutlich den zeitlichen Verlauf der Materialanteile von PKWs bei ihrer Verschrottung.

**Tabelle 3.1** Materialanteile am Leergewicht von PKWs bei ihrer Verschrottung; durchschnittliche Lebensdauer etwa zehn Jahre [8, S.17]

Materialien	Verschrottungsjahr					
	1980/85		1990/95		2000	
	[kg]	[Gew.-%]	[kg]	[Gew.-%]	[kg]	[Gew.-%]
Stahl	560	55,1	535	53,0	465	47,0
Gußeisen	142	14,0	126	12,5	109	11,0
NE-Metalle	45	4,5	53	5,2	59	6,0
Gummi	53	5,2	51	5,0	50	5,0
Kunststoffe	45	4,5	91	9,0	158	16,0
Glas	40	3,9	40	4,0	40	4,0
Sonstiges	130	12,8	114	11,3	109	11,0
<b>Gesamt</b>	1015	100,0	1010	100,0	990	100,0

Geht man von der vorrangigen Zielsetzung der Autodemontage aus, so kann man die dabei resultierenden Materialströme und anzustrebenden Kreisläufe darstellen (vgl. Abbildung 3.1).



**Abbildung 3.1 Autodemontage / Materialströme [8, S. 32]**

In der ersten Stufe der Demontage/Verwertung von Altfahrzeugen werden sämtliche Betriebsstoffe und -flüssigkeiten verwertungsgerecht entfernt. Dieser Vorgang wird häufig als „Trockenlegung“ bezeichnet.

### 3.1 Betriebsflüssigkeiten

Bei der Trockenlegung anfallende Betriebsflüssigkeiten sind:

- |  |  |
|--|--|
| Benzin bzw. Dieselmotorenöl:             | - werden in separaten Tanks gesammelt.   |
| Motorenöl, Getriebe- und Differentialöl: | - kann in einem Destillationsprozeß gereinigt und mit neuen Additiven versetzt werden und so als Zweitrafinat Verwendung finden. |

Hydrauliköle, Bremsflüssigkeit:	- werden gesammelt und wiederaufbereitet. Sie werden zu anderen Produkten wie Verdünnern, Putz- oder Reinigungsmitteln weiterverarbeitet, da die hohen Sicherheitsanforderungen im Automobilbau einen Wiedereinsatz, als z.B. Bremsflüssigkeit, verbieten.
Kühlflüssigkeit:	- besteht meist aus einer 1:1 Mischung Wasser und Ethylenglykol mit Additivzusätzen zum Schutz des Motors. Sie läßt sich aufbereiten, und ist nahezu vollständig biologisch abbaubar.
Kältemittel für Klimaanlage:	- werden mit speziellen Geräten abgesaugt und entsprechend den Vorschriften entsorgt.

Nach der Trockenlegung des Fahrzeugs sollen Teile, für die geschlossene Recyclingkreisläufe bestehen, ausgebaut werden, insbesondere wenn sie eine spürbare Reduzierung der Abfallmenge ermöglichen. Für viele neuere Fahrzeuge gibt es diesbezüglich spezielle Demontagelisten, in denen die zu demontierenden Baugruppen und -teile mit ihren Werkstoffen aufgelistet sind. Damit ist eine sortenreine Sammlung, welche Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling ist, in verschiedenen Behältern, Gitterboxen oder Container, möglich. Grundsätzlich gilt, je sortenreiner sortiert werden kann, desto einfacher und wirtschaftlicher ist die Verwertung.

## 3.2 Demontagerihenfolge

Folgende Reihenfolge wird bei der Demontage von Altfahrzeugen empfohlen: [2, S.6]

1. Entfernen von Abfällen und Druckbehältern wie z. B. Feuerlöscher, Spraydosen.

### 2. Starterbatterie

Die Batteriesäure wird bei der Zerlegung aufgefangen und einer Aufbereitung unterzogen. Blei wird vollständig rezykliert und das Batteriegehäuse wird in der Kunststoffindustrie wiederverwertet.

### 3. Pyrotechnische Treibsätze von Airbags und Gurtstraffern

Ein Airbag bzw. Airbagmodul besteht aus den Komponenten Gasgenerator, Luftsack und Gehäuse. Ein Gurtstraffer aus einem Mikrogenerator und der Gurtmechanik. Die Gasgeneratoren selbst beinhalten eine Zündpistole als elektrischer Zünder, eine Verstärkungsladung und einen Treibsatz.

Wie alle pyrotechnischen Erzeugnisse unterliegen auch Airbags und Gurtstraffer wegen der darin enthaltenen chemischen Treibsätze besonderen gesetzlichen Vorgaben, die unter anderem im Sprengstoffgesetz geregelt sind.

Bei Altfahrzeugen, die zur Weiterverwertung anstehen und mit pyrotechnischen Bauteilen ausgestattet sind, ist in jedem Fall sicherzustellen, daß diese Bauteile durch geeignete Maßnahmen von geschultem Fachpersonal unschädlich gemacht werden, da nicht gezündete pyrotechnische Komponenten bei der Verschrottung eine Gefahr für Menschen und Umwelt darstellen können.

#### 4. Motoren, Getriebe, Achsen, Starter, Lichtmaschine, diverse Elektromotoren usw.

Diese werden wenn möglich unversehrt geborgen, wiederaufbereitet, instandgesetzt und dem Ersatzteilgeschäft zugeführt.

Instandsetzung und Modernisierung sind wichtige Elemente des Produktrecyclings. Durch Produktrecycling kann gegenüber der Verwendung von neuen Produkten eine Einsparung im Stoffinput um 30 % und an Produktionsenergie um 40 % erreicht werden. Jedoch erhöht sich der Anteil an menschlicher Arbeit um 140 %.

#### 5. Räder und Reifen [9, S. 64]

Ein typischer Mittelklassewagen besteht aus ca. 50 kg Gummi, der Großteil davon stammt von den Reifen. Etwa ein Drittel der Altreifen werden in Zementfabriken unter der Ausnutzung ihrer thermischen Energie verbrannt.

Zwischen 15 und 50 % der Altreifen werden runderneuert und wiederverwendet. Bei der Runderneuerung eines Reifens wird 66 % der ursprünglich zur Produktion benötigten Energie eingespart.

#### 6. Katalysatoren

Das Recycling von Katalysatoren ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen unabdingbar. Am weitesten verbreitet sind heute Katalysatoren mit keramischen Träger.

Ein Katalysator beinhaltet zwischen 4 - 8 g Platin und 0,8 - 1,5 g Rhodium und Palladium. In einem Bergwerk müssen für 1 g Pt etwa 300 kg Gestein gelöst, gefördert, gemahlen und aufbereitet werden. Etwa 1/3 der weltweiten Platin- und 3/4 der weltweiten Rhodiumproduktion geht in die Katalysatorherstellung.

Die Rückgewinnungsquote für Pt aus Altkatalysatoren liegt bei 90 bis 98 % und für Rhodium bei 70 bis 75 %. Die Rückgewinnung von Platin aus Altkatalysatoren ist zudem von nur ca. 5 kg Abfall begleitet. Die hohe Toxizität dieser Metalle erfordert bei der Aufbereitung jedoch ein hohes Maß an Sicherheitsvorkehrungen, um den gesetzlich vorgeschriebenen Arbeitnehmerschutzbestimmungen zu entsprechen.

Es wird prognostiziert, daß die Versorgung der Katalysatorindustrie mit Platin und Rhodium auf die Dauer nur durch Recycling gesichert werden kann. [2, S. 8]

### 7. Kühler, Heizungs- und Klimaanlage

Kühler werden wegen ihres hochwertigen Materials traditionell bei der Verschrottung von Fahrzeugen ausgebaut und demontiert. Der Kühlerblock wird wiederverwertet.

Neue Heizungs- und Klimaanlage werden bei modernen Fahrzeugen recyclinggerecht konstruiert, d.h. mit lösbaren Verbindungen, verringerter Werkstoffvielfalt und stofflich gekennzeichneten Bauteilen.

### 8. Kabelstränge

Zwischen 1 und 3 km Kabel mit einem Kupfergewicht bis zu 50 kg werden in Fahrzeuge eingebaut. Bei modernen Fahrzeugen kann der Kabelstrang in einem Stück aus dem Fahrzeug entfernt werden. Schwieriger wird es bei Kabelbäumen, die aus älteren Fahrzeugen demontiert werden.

### 9. Glas

Theoretisch kann das Glas immer wieder zur Glasherstellung ohne Qualitätseinbußen eingesetzt werden. Inzwischen werden Techniken zur Trennung von Kleberesten, Folien und Metalleinschlüssen entwickelt, die eine so hohe Reinheit des gewonnenen Glasgranulats ermöglichen, daß es problemlos in der Glasproduktion wieder eingesetzt werden kann [2, S. 8].

Durch den Einsatz von Altglas können große Mengen an Glassand, Kochsalz, Dolomit- und Kalkstein eingespart werden.

### 10. Kunststoffe

Um Kunststoffe stofflich, also als Rezyklat, zu verwerten, ist eine sortenreine Sammlung von Nöten. Dies bereitet jedoch bei der Vielfalt an eingesetzten Kunststoffen erhebliche Probleme. Eine Beschränkung auf eine verminderte Anzahl von verwendeten Kunststoffarten, sowie eine recyclinggerechte Konstruktion würden hier Abhilfe schaffen.

## 4 Kunststoffe

Kunststoffe sind vollsynthetisch oder durch Umwandlung hochmolekularer Naturprodukte hergestellte makromolekulare organisch-chemische Werkstoffe [21, S. 580]. Makromoleküle bestehen in der Regel aus vielen, gleichen Einzelbausteinen, den sogenannten Monomeren (mono=einzeln, meros=Teil), die durch eine chemische Bindung miteinander verknüpft sind. Viele dieser Monomeren bilden ein kettenförmiges Großmolekül. Man bezeichnet Kunststoffe daher auch als Polymere (poly=viele). Eine Möglichkeit der Charakterisierung von Makromolekülen besteht in der Angabe des Molekulargewichtes. Dabei handelt es sich meist um ein mittleres Molekulargewicht, da bei der Herstellung eines Kunststoffes unterschiedlich lange Ketten entstehen. Für eine exakte Beschreibung muß daher die Molekulargewichtsverteilung und die dazugehörige Polydispersität (Uneinheitlichkeit) angegeben werden [10, S.5].

Die Herstellung der Kunststoffe wird allgemein als Polymerisation bezeichnet. Der Begriff Polymerisation wird sowohl als Überbegriff verwendet, als auch als Bezeichnung für ein bestimmtes Herstellverfahren.

Um eine bessere Übersicht bei den sich am Markt befindlichen Kunststoffen zu bekommen werden Kurzzeichen verwendet [11]:

### Kunststoffe

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ECTFE	Ethylenchlortrifluorethylen
EP	Epoxid
EVAL	Ethylenvinylalkohol
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PCTFE	Polychlortrifluoretbylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte
PETP	Polyethylenterephthalat
PF	Phenol-Formaldehyd
PFA	Perfluoralkoxi-Cop.
PFEP	Polytetrafluorethylenperfluorpropylen
PIB	Polyisobutylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen (Polyacetal)
PP	Polypropylen
PPO	Polyphenylenoxid
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan



PVC	Polyvinylchlorid
PVCC	Chloriertes Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
UP	Ungesättigte Polyester

### **Verstärkte Kunststoffe**

GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
SFK	Synthesefaserverstärkter Kunststoff

### **Kautschuke**

BR	Butadien-Kautschuk
CR	Chloropren-Kautschuk
CSM	Chlorsulfonylpolyethylen
EPDM	Ethylen-Propylen-Terpolymer
FPM	Vinylidenfluorid-Hexafluorpropylen-Copolymer
IIR	Isobutylene-Isopren-Kautschuk
IR	Isopren-Kautschuk (syntetisch)
NBR	Acrylnitril-Butadien Kautschuk
NR	Isopren-Kautschuk (Naturkautschuk)
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk

## **4.1 Herstellung**

Grundsätzlich unterscheidet man drei Verfahren mit denen Kunststoffe hergestellt werden können [21, S. 580] [38, S. 534]:

- Polymerisation
- Polykondensation
- Polyaddition

### **4.1.1 Polymerisation**

Die Voraussetzung für die Möglichkeit einer Polymerisation ist das Vorhandensein von mindestens einer Doppelbindung in jedem Monomer. Polymerisate entstehen durch die schrittweise Anlagerung von jeweils einem Monomer an die wachsende Polymerkette. Daher kann die Polymerisation auch Monomerverknüpfung genannt werden.

Der Reaktionsablauf kann unterteilt werden in Start-, Wachstums- und Abbruchreaktion. Der Start der Reaktion erfolgt häufig durch einen Initiator, der die Kettenreaktion entweder radikalisch, anionisch oder kationisch auslöst, oder aber auch durch Wärme- oder Energiestrahlung.

Während der Wachstumsphase lagert sich jeweils ein Monomer unter Spaltung der Doppelbindung an das aktive Kettenende an.

Das Ende der Reaktion erfolgt mit Zunahme der Viskosität der Schmelze durch unterschiedliche Abbruchmechanismen (Rekombination, Disproportionierung und Übertragungsreaktionen).

Klassische Beispiele von Polymerisationen sind die Polyolefinsynthesen (Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol), die Herstellung von Polyvinylchlorid (PVC) oder auch Polymethylmethacrylat (PMMA).

### 4.1.2 Polykondensation

Polykondensation und -addition werden oft als Stufen- bzw. Gleichgewichtsreaktionen bezeichnet, da im Gegensatz zu der Polymerisation, bei der immer wieder genau ein Monomer an die wachsende Kette angelagert wird, hier auch Zwischenprodukte miteinander reagieren können.

Als Polykondensation wird der Reaktionstyp bezeichnet, bei dem niedermolekulare Substanzen unter Abspaltung von Nebenprodukten (wie z.B. Wasser, Ammoniak oder Alkohol) miteinander zu Makromolekülen reagieren. Voraussetzung dafür ist, daß die an der Reaktion beteiligten Edukte mindestens zwei funktionelle Gruppen besitzen. Es ist auch möglich, verzweigte und vernetzte Polymere herzustellen, wenn entsprechend viele funktionelle Endgruppen vorhanden sind.

Die Polykondensation ist eine echte chemische Gleichgewichtsreaktion. Das bedeutet, das Reaktionssystem ist immer bestrebt, in einem für jeden Reaktionsansatz definierten Gleichgewichtszustand zwischen Edukten und Produkten zu verbleiben. So kann bei einer solchen Reaktion durch Entfernen einer Komponente aus dem Prozeß das Gleichgewicht in eine gewünschte Richtung verschoben werden. Beispielsweise kann durch Entzug von Spaltprodukten (wie Wasser) das Gleichgewicht auf die Seite der Produkte verschoben werden und ein hoher Reaktionsumsatz erzielt werden.

Die Herstellung von Polycarbonat (PC), Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PETP) sind Beispiele für die Polykondensation.

### 4.1.3 Polyaddition

Die Polyaddition ist eine chemische Reaktion, bei der verschiedenartige Moleküle ohne Abspaltung von Nebenprodukten zu Makromolekülen verbunden werden. Bei der Reaktion vollzieht sich eine intramolekulare Umlagerung von H-Atomen, die sich aus den funktionellen OH-, NH<sub>2</sub>- oder COOH-Gruppen lösen lassen, zu einem anderen Molekül. Die sich hierbei bildenden Hauptvalenzen bewirken die Verknüpfung der Moleküle. Demzufolge handelt es sich auch nicht, wie bei der Polykondensation, um eine chemische Gleichgewichtsreaktion. Die Reaktion ist dann beendet, wenn den funktionellen Gruppen des einen Ausgangsstoffes keine der anderen Komponenten mehr gegenüberstehen.

## 4.2 Verwendung

Die mengenmäßig wichtigsten Polymerwerkstoffe im Fahrzeugbau sind neben den Elastomeren für Reifen, Polypropylen **PP** und Polyurethan **PUR** (Abb. 4.1).

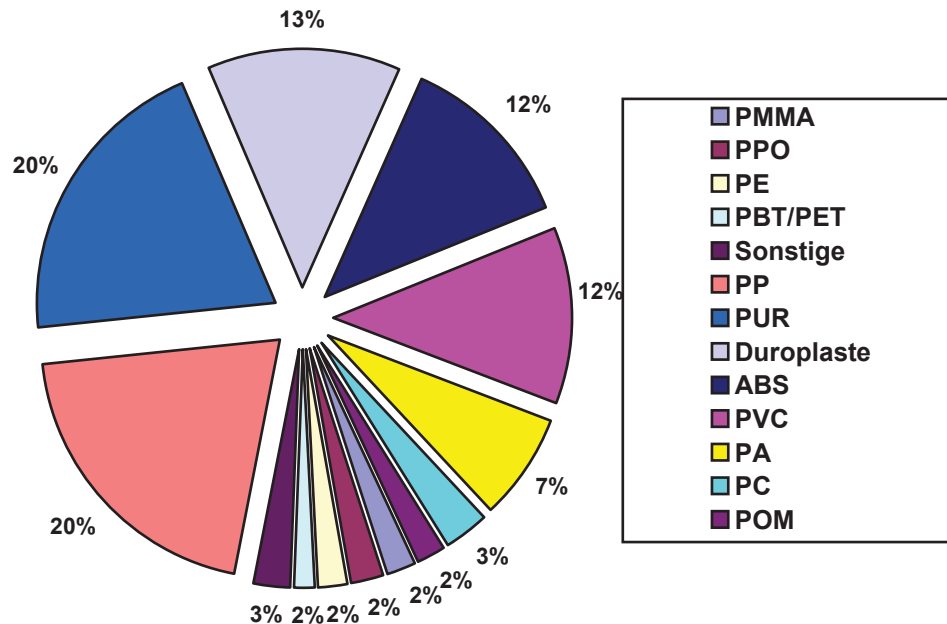


Abbildung 4.1 Kunststoffverbrauch nach Sorten in der Fahrzeugindustrie [12, S. 175]

Um Kunststoffe verarbeiten zu können ist es von entscheidender Bedeutung in welcher Gestalt die Polymere vorliegen. Es können drei unterschiedlich aufgebaute Typen unterschieden werden:

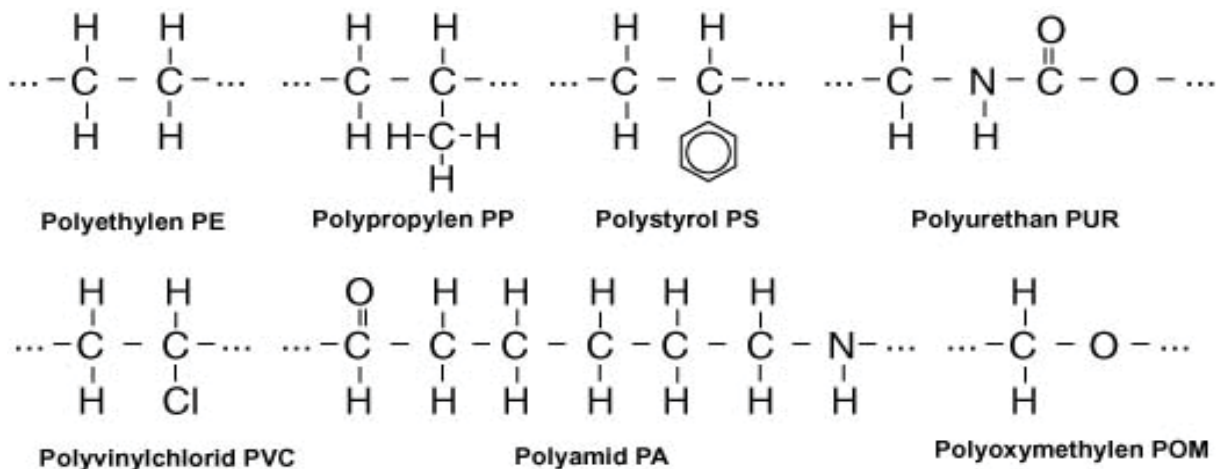
- Thermoplaste
- Elastomere
- Duroplaste

### 4.2.1 Thermoplaste

Thermoplaste sind Kunststoffe die in Wärme erweicht und verformt werden können. Bei Abkühlung erstarren sie wieder. Soweit keine thermische Überbeanspruchung vorliegt, ist dieser Vorgang beliebig oft wiederholbar, was eine ausgezeichnete Recyclingfähigkeit durch erneutes Einschmelzen zur Folge hat.

Thermoplaste lassen sich spanend und spanlos bearbeiten, sind quellbar und in Lösemitteln löslich. Wegen ihrer ausgesprochen günstigen Fertigungseigenschaften bei guten Gebrauchseigenschaften ist die Gruppe der thermoplastischen Kunststoffe mengenmäßig und anwendungstechnisch die wichtigste Polymerklasse. Sie werden nach den Monomeren benannt, aus denen sie bestehen, da diese von ausschlaggebender Bedeutung für die Eigenschaften dieser Kunststoffe sind (Abb. 4.2). Weitere Parameter mit großer Bedeutung

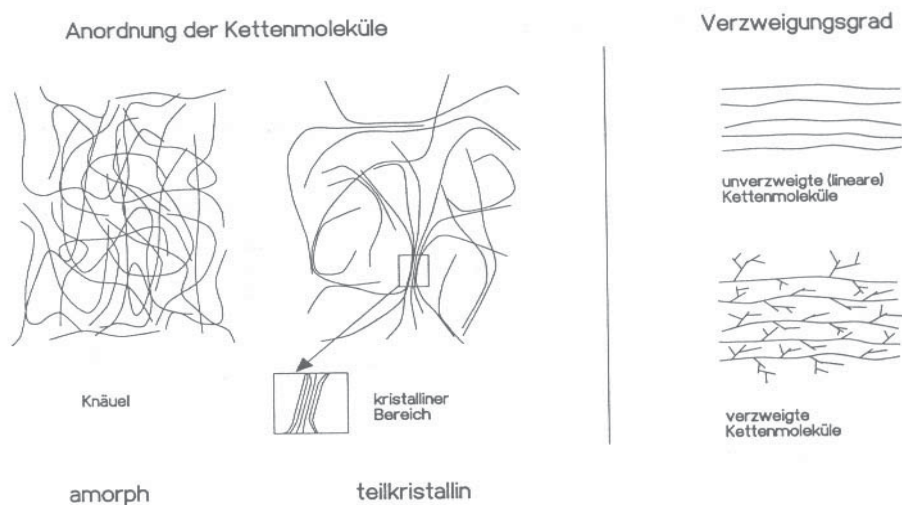
für die Eigenschaften der Thermoplaste sind die mittlere Kettenlänge (ausgedrückt durch die Molmasse) und deren Verteilungsfunktion sowie die Anordnung unsymmetrischer Seitengruppen (Konfiguration, z.B. beim Polypropylen PP ).



**Abbildung 4.2 Monomere, aus denen wichtige thermoplastische Kunststoffe aufgebaut sind [13, S. 48]**

Es wird bei den Thermoplasttypen zwischen den amorphen und den teilkristallinen Thermoplasten unterschieden.

Bei amorphen Thermoplasten sind die Polymerketten strukturlos angeordnet. Es handelt sich hierbei um ein ungeordnetes, ineinander verschlungenes Knäuel von Polymerketten. Lineare und wenig verzweigte Polymerketten können auch sogenannte kristalline Bereiche ausbilden (vgl. Abb. 4.3). Thermoplastische Polymere, die sowohl kristalline als auch amorphe Bereiche enthalten, nennt man teilkristallin. Durch hohe Verzweigungsgrade, aber auch durch sperrige Substituenten an der Hauptkette (z.B. Benzolringe) sinkt der Anteil der kristallinen Bereiche und damit der Kristallinitätsgrad.



**Abbildung 4.3 Schematische Anordnung der Moleküle in Thermoplasten [10, S. 12]**

Im Kfz- Bau oft verwendete Thermoplaste [14, S. 4]:

- Polyethylen **PE** (Folien, Kunststoffkraftstoffbehälter, Lüftungskanäle, Stoßfängerelemente, Wischwasserbehälter)
- Polypropylen **PP** (Konsolen, Innenverkleidungen, Stoßfänger, Radhausschalen)
- Acrylnitril-Butadien-Styrol **ABS** (Türablagen, Kühlgitter, Lenksäulenverkleidungen)
- Polyamid **PA** (Kühlwasserkästen, Radblenden, Spiegelgehäuse, Lüfterzargen)
- Polymethylmetacrylat **PMMA** (Blinkleuchten, Heckleuchten)

Weitere Thermoplaste:

- Polyvinylchlorid **PVC** (Folien, Rohre, Fensterrahmen, Kabelisolierungen)
- Polystyrol **PS** (glasklare Kunststoffteile, Spritzgußteile)
- Polyoxidmethylen **POM** (Steckverbinder, Clipse, Lagerkomponenten)
- Polycarbonat **PC** (Streuscheiben von Scheinwerfern)

### 4.2.2 Elastomere

Im Gegensatz zu den Thermoplasten besitzen Elastomere (Kautschuke) und die Duroplaste chemische Bindungen zwischen den einzelnen Polymerketten. Diese Form der Verknüpfung wird „räumliche Vernetzung“ genannt.

Elastomere zeichnen sich durch wenige Vernetzungspunkte aus. Durch das lose, weitmaschige Netzwerk können die Molekülketten unter verhältnismäßig geringer äußerer Krafteinwirkung gegeneinander abgleiten, bleiben jedoch miteinander verbunden und können anschließend den Ausgangszustand wieder einnehmen (Rückstellkraft). Elastomere sind bei Raumtemperatur gummielastisch, lassen sich allerdings nicht mehr aufschmelzen. Sie besitzen eine begrenzte Löslichkeit, quellen jedoch stark.

Hauptanwendungsgebiet dieser Polymere ist die Gummiindustrie, z.B.:

- Butadien-Kautschuk **BR** (Autoreifen, Auskleidungen, Isoliermaterial)
- Ethylen-Propylen-Terpolymer **EPDM** (Kfz-Dichtungsprofile)
- Naturkautschuk **NR** (Weich- und Hartgummi, Schläuche, Dichtungen)
- Styrol-Butadien-Kautschuk **SBR** (Autoreifen)
- Chloropren-Kautschuk **CR** (Kabelummantelung, Schaumgummi)

### 4.2.3 Duroplaste

Duroplaste bestehen aus räumlich hochvernetzten Polymeren und entstehen durch Vermischung der fließfähigen, monomeren Vorprodukte bei der Formgebung. Sie werden durch irreversible chemische Prozesse zu Fertigprodukten ausgehärtet. Der große Vorteil dieser Kunststoffgruppe liegt darin, daß sie aufgrund ihrer Struktur chemisch und thermisch

sehr widerstandsfähig sind. Duroplaste sind nicht mehr umformbar, nicht quellbar und nicht in Lösemitteln löslich. Eine Erwärmung verursacht ab einer gewissen Grenze lediglich die Zersetzung der Polymere.

Duroplaste werden oft aufgrund ihrer hohen Härte und thermischen Stabilität eingesetzt.

Eine Verwertung ist hier hauptsächlich thermisch (Pyrolyse, Verbrennung) oder rohstofflich nach der Zerlegung in die Ausgangsstoffe möglich. In einigen Fällen ist auch ein werkstoffliches Recycling möglich (vgl. Kap. 5).

Einige wichtige Duroplaste sind:

Ungesättigte Polyester **UP** (Gießharz, Lacke, Spachtelmassen)

Epoxidharz **EP** (Lacke, Gießharz, Klebstoffe)

Phenol-Formaldehyd **PF** (elektrische Isolierstoffe, Hartfaserplatten, Lackharze, Holzleim)

Polyurethan **PUR** (Gieß / Streichmassen, Schaumstoffe, Sitzpolster, Dachhimmel)

Polyethylenterephthalat **PETP** (Flaschen, Verpackungen)

## 5 Verwertungsstrategien für Kunststoffe aus der Autodemontage

Konsumrückstände aus Kunststoff sind aufgrund der bereits durchlaufenen Gebrauchsphase verschmutzt und weisen eine Typenvielfalt verwendeter Werkstoffe auf. So auch Kunststoffe aus der Altfahrzeugaufbereitung. Hieraus wird deutlich, daß diese Rückstände nicht problemlos aufzuarbeiten und rezyklierbar sind.

Die Zusammensetzung der aufzubereitenden Rückstände entscheidet im wesentlichen darüber, welche Kunststoff-Verwertungsverfahren zur Anwendung kommen. Das werkstoffliche Recycling stellt hier die höchsten Anforderungen an die Eigenschaften des aufzuarbeitenden Stoffes um ein qualitätsgesichertes Rezyklat herstellen zu können [15, S. 51]. Grundsätzlich soll auf Metallanlagen sowie unlösbare Verbindungen von verschiedenen Materialien verzichtet werden. Verbundteile aus chemisch nicht kompatiblen Polymerwerkstoffen sind zu vermeiden da sie sich während der Verarbeitung nicht mischen und scharfe Grenzflächen zwischen den Polymeren bilden. Ihre Verträglichkeit ist aber auch von der Verarbeitungstemperatur abhängig. Der Zusammenhang Mischungsverhältnis / Temperatur zu Verträglichkeit kann in Phasendiagrammen dargestellt werden. Da die Darstellung und Ermittlung solcher Phasendiagramme jedoch sehr aufwendig ist, werden von den Rohstoffherstellern zur ersten Orientierung sogenannte Verträglichkeitsmatrizen [2, S. 20] angeboten (vgl. Tabelle 5.1).

**Tabelle 5.1 Chemische Verträglichkeit wichtiger Kunststoffe**

	ABS	PA	PC	PE	PMMA	POM	PP	PBT	PVC	PC+ PBT	ABS+ PC
ABS	●	■	■	×	●	×	×	■	■	■	●
PA	■	●	×	×	×	×	■	■	×	■	■
PC	■	×	●	×	■	×	×	●	×	●	●
PE	×	×	×	●	×	×	■	×	×	×	×
PMMA	●	×	■	×	●	×	×	×	●	■	■
POM	×	×	×	×	×	●	×	■	■	■	×
PP	×	■		■	×	×	●	×	×	×	×
PBT	■	■	●	×	×	■	×	●	■	●	■
PVC	■	×	×	×	●	■	×	■	●	■	■
PC+ PBT	■	■	●	×	■	■	×	●	■	●	■
ABS+ PC	●	■	●	×	■	×	×	■	■	■	●

● gut verträglich

■ beschränkt verträglich

× nicht verträglich

Durch Zugabe von bestimmten Additiven (Verträglichkeitsverbesser) kann die Verträglichkeit von Polymeren erhöht werden. Ein guter Verträglichkeitsverbesser sollte [10, S. 162]:

- die Oberflächenspannung in der Grenzschicht reduzieren
- eine feine Dispersion während des Mischvorganges erlauben
- ein Mittel zur Stabilität gegen grobe Trennung während des Verarbeitungsprozesses bis zum endgültigen Produkt zur Verfügung stellen
- zu einer verbesserten Grenzschichtadhäsion führen

Jedoch erschwert gerade die Vielzahl der eingesetzten Additive das Recycling. Die Verträglichkeit der verschiedenen Kunststoffe ist manchmal, gerade wegen diesen unterschiedlichen Additivgaben, nicht gegeben (vgl. Tabelle 5.2) [10, S. 9]. Vielfach sind diese Zugaben den Verwertungsbetrieben nicht bekannt und erschweren ein qualitatives Recycling.

**Tabelle 5.2 Gebräuchliche Additive**

Additive	Wirkungsweise
Antistatiker	Erhöhung der Oberflächenleitfähigkeit
Farbmittel	Es werden Farbstoffe (im Kunststoff löslich) und Pigmente (unlöslich) unterschieden
Flammschutzmittel	1. Radikale, die sich in der Flamme ausbilden, werden abgefangen (Radikalfänger) 2. Ausbildung einer Wärmeschranke, Selbstverlöschung
Füllstoffe	Es gibt zwei Arten von Füllstoffen, solche die gewisse Eigenschaften des Polymers verstärken (z.B. Glaskugeln) und solche, die nicht verstärken, sondern nur „füllen“.
Gleit- und Trennmittel	Gleitmittel erniedrigen den Reibungskoeffizienten zwischen Kunststoff und Maschinenteil sowie zwischen den einzelnen Molekülketten. Trennmittel dienen der besseren Entformbarkeit aus dem Werkzeug.
Schlagzähmodifikatoren	Sie erhöhen die Schlagzähigkeit; meist sind es kautschukartige Polymere.
Stabilisatoren	Ein chemischer Abbau unter Sauerstoffeinwirkung oder Wärme wird verhindert. Alterungsschutzmittel, wie Radikalfänger, Hydroperoxidzerstörer und Metalldesaktivatoren verhindern einen Kettenabbau. Lichtschutzmittel schützen vor UV-Strahlungseinflüssen.
Verstärkungsmittel	Sie erhöhen insbesondere die mechanischen Eigenschaften; üblich sind vor allem Glas- und Kohlenstoffasern.
Weichmacher	Sie verringern die Härte und Sprödigkeit von Materialien durch Erniedrigung der Glasübergangstemperatur.

Als Weichmacher werden überwiegend schwerflüchtige Ester verwendet. Wichtige Vertreter dieser Stoffklasse sind die Phthalsäure- und die Adipinsäureester.



Füllstoffe sind meist anorganischer Natur. Vielfach werden Kreide, Gesteinsmehl, Kaolin, Ruß und Titanoxid verwendet.

Kunststoffartikel werden in vielen unterschiedlichen Farben produziert. Die chemische Natur dieser meist organischen Farbstoffe ist den Recyclingbetrieben fast nie bekannt.

Als Flammenschutzmittel sind organische Chlor- und Bromverbindungen, Phosphatester, Antimontrioxid zusammen mit organischen Halogenverbindungen und anorganische Hydroxide gebräuchlich [12, S. 44].

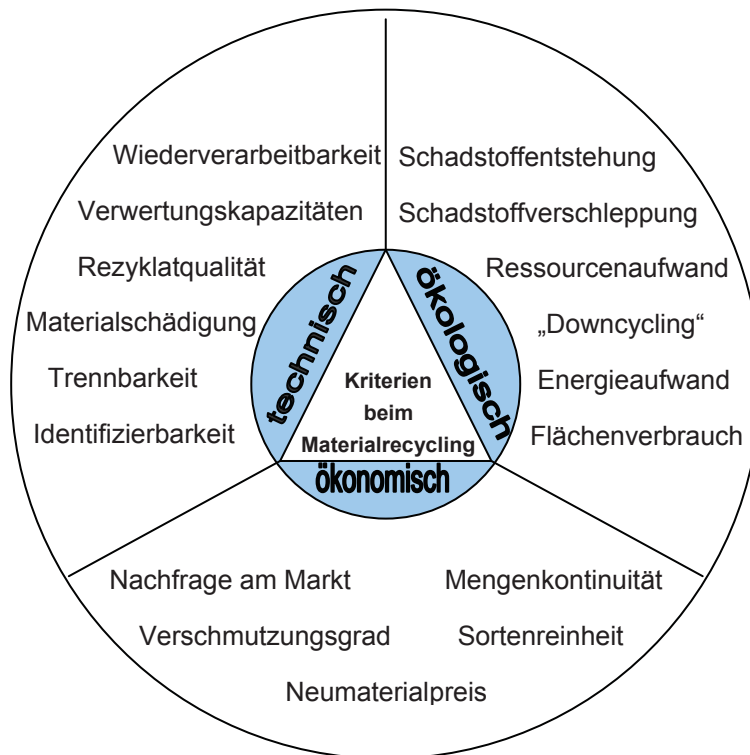
Weiters sei die Kennzeichnung von Kunststoffen angesprochen, die eine wichtige Voraussetzung für deren sortenreine und damit hochwertige Wiederverwertung ist und diese überhaupt erst möglich macht. Alle Kunststoffe in einem modernen Fahrzeug sollten gekennzeichnet werden. Ihre einwandfreie Erkennbarkeit ist eine wichtige Voraussetzung für die Zuführung der einzelnen Materialien in einen für sie geeigneten Wiederverwertungszyklus.

Normen für die Werkstoffkennzeichnung:

- ISO Norm 1043 für Kunststoff- Kurzzeichen
- ISO Norm 11469 für Kunststoffe, sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff- Formteilen
- VDA-Richtlinie 260 über die Kennzeichnung von Bauteilen aus polymeren Werkstoffen

Auch die leichte Demontierbarkeit der einzelnen Bauteile ist eine weitere wichtige Voraussetzung für das Recycling. Eine demontagegerechte Konstruktion soll eine schnelle Demontage sortenreiner Bauteile mit minimalem Aufwand ermöglichen. Verbindungen sollen zerstörungsfrei zu lösen sein. Dieses Kriterium ist auch als Konstruktionsziel „Reparaturfreundlichkeit“ bekannt.

Zuletzt muß man bei der Wahl eines geeigneten Verwertungsverfahrens sicherstellen, das dieses mit einem konstanten Inputstrom versorgt werden kann. Die dafür notwendige Entsorgungslogistik muß alle Stufen des Sammelns, Transportierens, Umschlagens und Verteilens beinhaltet.



**Abbildung 5.1 Kriterien beim Materialrecycling [15, S. 7]**

Um Erfahrungen mit den beim Materialrecycling zu beachtenden Kriterien zu bekommen (vgl. Abb. 5.1), und der Unwissenheit der Verwerterbetriebe über die jeweilig angelieferte Materialzusammensetzung entgegenzuwirken, haben sich viele Fahrzeughersteller mit Verwertungsbetrieben zu diversen Pilotprojekten zusammengeschlossen (vgl. Tab. 5.3).

**Tabelle 5.3 Projekteübersicht**

Firma/Projekt	Bemerkung
VDIK-Verband der Importeure von Kraftfahrzeugen (Honda, Toyota, Mazda, Subaru, Rover, Lada und Verwerterbetriebe) -Deutschland	Demontage von Importfahrzeugen
Nissan -Deutschland	Rückgabe von PP-Stoßfängern über Vertragspartner und Werkstätten an Recyclingunternehmen
Rover, ADAC	Zerlegung verschiedener Modelle zum Sammeln von Demontageerfahrungen
VOLVO –Deutschland	Ausgabe von Demontagekatalogen an Werkstätten (Identifizierung von

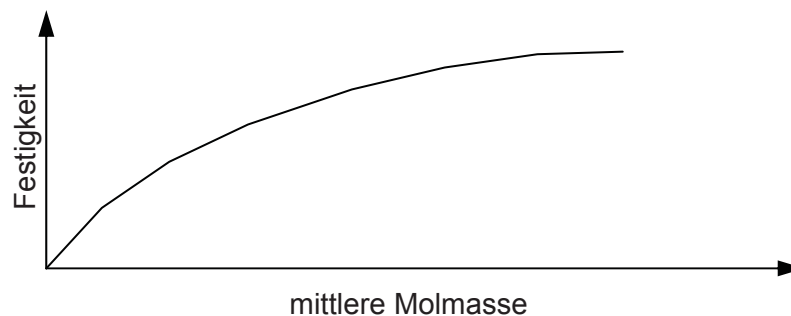
	Kunststoffen), kostenlose Rücknahme von alten Stoßfängern durch die Vertragspartner
PRAVDA 1/2	Demontageprojekt aller deutschen Automobilhersteller
Klöckner -Deutschland	Klöckner Kunststoff- und Automobilrecycling GmbH, Kooperation mit Kiesow-Autoverwertung, Planung von Verwertungszentren
ACCORD –England	ACCORD (Automotive Consortium on Recycling & Disposal), Zusammenschluß verschiedener Auto- und Recyclingfirmen (Ford, Rover, Vauxhall, BMW, Jaguar, Nissan, Peugeot-Talbot)
BMW –England	Rückgabe von Altfahrzeugen an Händler zwecks Recycling
BMW / Renault	Gemeinschaftsprojekt zur Altautodemontage in Deutschland und Frankreich
BMW –USA	Errichtung von Sammelzentren für Altfahrzeuge, Neuwagenkäufer erhält bei Rückgabe seines Altautos \$ 500
Fiat, Lancia, Alfa-Romeo –Italien	Demontageprojekt im Stammwerk Mirafiori
Fiat –Italien	Projekt Phönix (Aufbau eines Abfalltransportsystems, Installation von Anlagen zur Energierückgewinnung)
Jaguar, UNI Nottingham –England	Gemeinschaftsprojekt zur Untersuchung der Recyclingfähigkeit von Kunststoffen
Peugeot, Citroen, Fiat, ICI –England	Forschungsprogramm RECAP (Recycling of Automobile Plastics), Untersuchung zur Wiederverwertung von Polymeren aus Altfahrzeugen
Rover –England	Aufbau eines flächendeckenden Rücknahmesystems über das Händlernetz
STIBA –Niederlanden	Vereinigung von ca. 400 Verwertern, die ihre

	Betriebe nach neuesten Umweltstandards ausrüsten; verschiedene Demontageaktivitäten
Toyota –Japan	Versuche zur Demontage von Neufahrzeugen in automatisierten Demontageanlagen
Volvo –Niederlanden	GOES-Projekt, Gemeinschaftsprojekt mit GE Plastics und STIBA (Demontage von Altautos und Rückgewinnung von Materialien)
Volvo –Schweden	Erstellung von Demontagestudien für Volvo-Flotte, Beteiligung von Dow Chemical und Verschrottungsunternehmen

## 5.1 Werkstoffliches Recycling

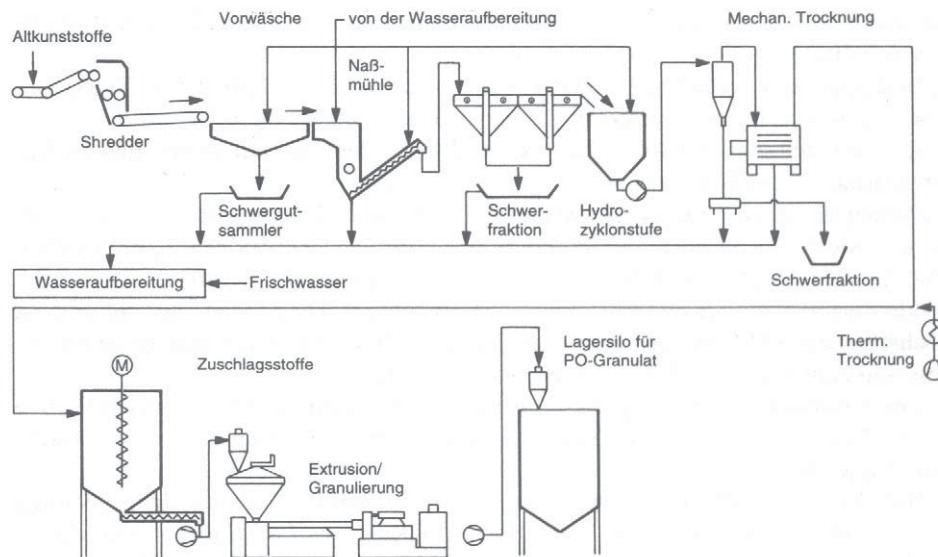
Beim werkstofflichen Recycling ist die Zielsetzung primär auf die Gewinnung des Materials ausgerichtet, d.h. das Bauteil und die Verbindungen können durch den Demontagevorgang auch gewaltsam gelöst werden.

Bei dieser Recyclingtechnologie werden Kunststoffe lediglich physikalischen Veränderungen unterworfen, wodurch die Makromolekularstruktur der Kunststoffe weitgehend erhalten bleibt. Die kombinierte thermische und mechanische Beanspruchung der Formmassen durch die Plastifiziereinheit der Extruder oder Spritzgußmaschinen bewirkt jedoch eine Spaltung der Molekülketten und somit eine Verschiebung der mittleren Molmasse zu geringeren Werten. Das hat einen Festigkeitsabfall zur Folge (vgl. Abb. 5.2) und einen Einfluß auf die Steifigkeit und Dehneigenschaften [13, S. 53].



**Abbildung 5.2 Verkürzung der Makromoleküle durch mechanische oder thermische Einflüsse hat einen Festigkeitsabfall zur Folge**

Weiters ist bei der Verwertung zu beachten, daß zum Einen Verunreinigungen das Aussehen und die Oberflächengüte wie Glanz, Transparenz und Farbe, sowie die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Reißdehnung, Schlagzähigkeit) der aus Rezyklat hergestellten Produkte beeinträchtigen. Sie führen im allgemeinen zu schlechteren Eigenschaften im Vergleich zur Neuware. Aus diesem Grund müssen bei einem verschmutzten, inhomogenen Input die Verfahrensschritte von der Vorsortierung über die Wäsche und Kunststofftrennung sowie Trocknung bis zur Extrusion und Granulierung reichen [16, S. 54] (vgl. Abb. 5.3).



**Abbildung 5.3 Verfahrensschema beim Regranulieren [9, S.45]**

Zum Anderen sind die diversen Kunststoffarten aus verarbeitungstechnischen Gründen nur bedingt miteinander verträglich (vgl. Tab. 4.1). Dies bedeutet, daß die unterschiedlichen Polymere sich nicht mehr molekular vermischen. Sie liegen mit schwacher Bindung nebeneinander und weisen dadurch schlechtere mechanische Eigenschaften auf.

Die genaue Rezeptur der Kunststoffmischungen (Compounds) wird aus Wettbewerbsgründen von Kunststoffherstellern und -verarbeitern vertraulich gehandhabt. Bei einem Umschmelzen sind daher Art und Mengen der Zuschläge und Additive (vgl. Tab. 5.2), die für den ursprünglichen Verwendungszweck des Polymers nützlich waren, meist nicht bekannt. Bei einer zweiten Verarbeitung können sie störend wirken, indem sich die Eigenschaften der Rezyklate nicht mehr gezielt einstellen lassen. Demnach sind die das Rezyklat charakterisierenden Eigenschaftsprofile jenen von Neuware unterlegen. Dies führt dazu, daß in jeder Recyclingrunde weniger Kunststoffrückstände aus dem Wertstoffpotential zur Herstellung des Rezyklats verwendet werden können, wenn die mechanischen Eigenschaften gewissen Anforderungen genügen sollen.

### 5.1.1 Thermoplaste

Thermoplaste haben als gemeinsames Merkmal, das sie bei einer Temperatur um 200°C schmelzen und in Form gebracht werden. Grundsätzlich sind diese Kunststoffe immer wieder aufschmelzbar. Diese Eigenschaft ermöglicht ein werkstoffliches Recycling, womit die Wiederverwertung eines Produktes in der selben oder ähnlichen Anwendung erreicht wird.

Auch hier stellt die Verschmutzung der Regranulate mit Fremdpartikeln ein Problem dar. Diese Fremdpartikeln können entweder Festkörper (Papier, Aluminium, Staub, Fremdpolymere usw.) oder Medien (Chemikalien, Farben, Öl usw.) sein.

Geringe Verunreinigungen durch Festkörper führen häufig zu einer Versprödung des Materials. Dies ist bei üblicherweise schlechter Anbindung des verunreinigenden Festkörpers an das umgebende Material durch innere Kerbwirkung der Feststoffpartikel, die im Material wie Fehlstellen wirken, zu erklären. In der Grenze zwischen Feststoffpartikel und umgebendem Material ergeben sich Spannungsspitzen, die zu einem frühzeitigen Versagen des Materials führen. Zur Charakterisierung dieses Effekts können die Schlag- bzw. Kerbschlagzähigkeit oder die Reißdehnung verwendet werden, da sich eine zunehmende Versprödung in einer Abnahme dieser Kennwerte zeigt [10, S.145].

Den Einfluß von Verunreinigungen bei Anbindung der Festkörperpartikel an das umgebende Material zeigt Abb. 5.4 am Beispiel eines durch Lack verunreinigten thermoplastischen Polypropylen-Elastomers, das von lackierten Stoßfängern stammt. Hier wurde das Rezyklat mit Neuware bei unterschiedlichen Rezyklatanteilen und damit auch Lackanteilen gemischt. Da die Lackpartikel eine höhere Steifigkeit als das umgebende Material aufweisen, ergibt sich ein Anstieg des Gesamtelastizitätsmoduls (E-Modul) bei gleichzeitiger Versprödung (Bruchdehnung).

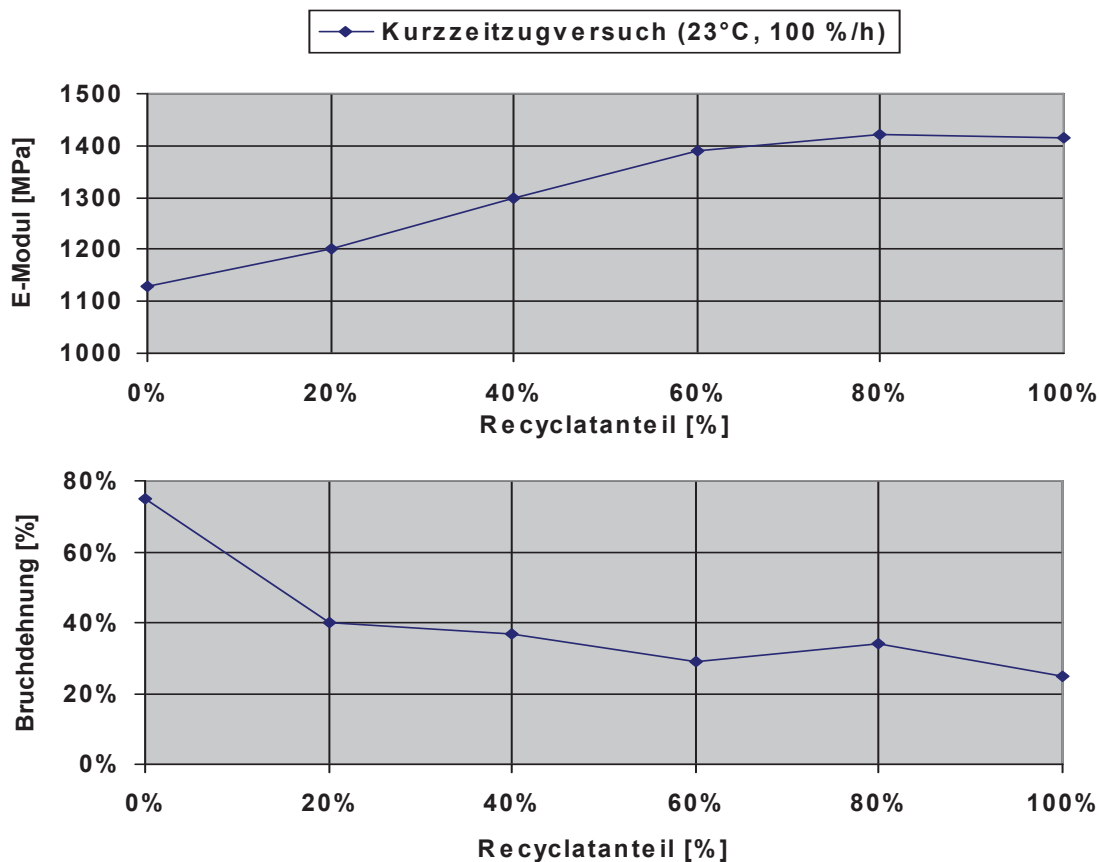


Abbildung 5.4 Einfluß Rezyklatanteil auf Steifigkeit eines Polypropylen-Elastomers [10, S. 147]

Aber auch bei der Verarbeitung von sortenreinen, sauberen Abfallfraktionen muß meist mit vom Neumaterial differierenden Eigenschaften gerechnet werden. Diese können durch mechanische (z.B. aufgrund der Scherung) und thermische Schmelzebelastungen bei der Plastifizierung im Verarbeitungsprozeß hervorgerufen werden, die zu molekularen Veränderungen des Materials führen. Großen Einfluß auf die Höhe der Schmelzebelastung hat die Verweilzeit. Eine verringerte Verweilzeit führt zu geringeren Belastungen und damit zu geringeren Schädigungen des Materials.

Durch die Schmelzebelastungen kommt es in der Regel zu einer Veränderung des Molekulargewichts bzw. der Molekulargewichtsverteilung. Ob die Belastung eine Zu- oder Abnahme des Molekulargewichts verursacht hängt vom Material, dem Grad der Schmelzebelastung und der Art der Verarbeitung ab [10, S. 125].

Weitere Reaktionsmöglichkeiten sind die Dissoziation schwach gebundener Seitenatome oder -gruppen mit Folgereaktionen durch frei gewordene Bindungen (z.B. Chlor in PVC mit anschließender HCl-Bildung) oder Depolymerisation durch sukzessives Abspalten von Endgruppen der Ketten [13, S. 52].

Auch bezüglich der stofflichen Verwertung von Thermoplasten versuchen viele Fahrzeughersteller, in Zusammenarbeit mit Verwertungs- und Kunststoffbetrieben, aus diversen Projekten Erfahrungen zu sammeln (vgl. Tab. 5.4).

**Tabelle 5.4 Auswahl einiger Projekte zur stofflichen Verwertung von Thermoplasten**

Firma	Bauteil/Werkstoff	Ergebnis/Bemerkung
BASF, VW, Audi	Kraftstoffbehälter aus HDPE	Durch Nachstabilisierung gute Materialkennwerte, Serienfreigabe ist geplant
BASF, VW	Stoßfängerbefestigung aus PBT/PC- Blend, lackiert	Geringe Einbußen der mechanischen Eigenschaften gegenüber Neuware
BASF, VW	Kühlergitter aus ASA	Materialwerte des Rezyklats vergleichbar mit Neuware
BASF, BMW	Kraftstoffbehälter aus HDPE	Einige mechanische Kennwerte können Werte der Qualitätsvorschrift noch nicht erfüllen
Bayer	Radkappen aus PA u. Füllstoffen	Geeignet für Bauteile mit geringeren Ansprüchen (Abdeckungen etc.)
Bayer	PUR aus Dachhimmeln	Klebpressen, Anwendung als Hutablage vorgeschlagen
Bayer	Kühlerschutzgitter aus ABS	Hochwertiges Rezyklat für Sekundäranwendung



Bayer	Stoßfänger aus PBT/PC-Blend, lackiert	Herstellung von hochwertigen Rezyklaten möglich, Serienfreigabe angestrebt
DSM, VW	Stoßfänger aus EMPP	Rezyklat für Serieneinsatz im Polo freigegeben
ERCOM	Bauteile aus Automobil- u. Elektroindustrie	Qualitätsgesichertes SMC-Rezyklat erhältlich
Hoechst, Opel, Metallgesellschaft	Altbatteriegehäuse aus PP, Stoßfänger aus EMPP	Einsatz in Bauteilen mit geringeren Ansprüchen (Radhausauskleidung -in Serie im Opel Calibra, Stoßfängerträger, Luftfiltergehäuse)
Hüls, Opel	Kühlwasserausgleichsbehälter aus PP	Hochwertiges Recyclat, Eignung zum originären Einsatz wird geprüft
Opel	Stoßfänger aus PC modifiziert	Rezyklat für Serieneinsatz (Halter Dachspoiler) im Astra
Opel	PUR-Weichschaum aus Polsterauflage	Herstellung von Dämmatten zur Geräuschisolation
Peguform	Stoßfänger (lackiert) aus PP/EPDM	Biege-E-Modul fällt ab Zugabe von 30% Rezyklat stark ab, keine Wertung bezüglich der Wiederverwertung
GEP, Ford, TU Berlin	Trennung von PUR-hinterschäumten Stoßfängern aus einem PC/PBTP-Blend	Versuche mit verschiedenen Trennmethode
Metallgesellschaft	Trennung von Metall-Kunststoffverbunden (Schalter)	Probleme bei der Identifizierung der Kunststoffarten

### 5.1.2 Versuchs/Projektergebnisse

Von 1994 bis 1997 führte die europäische Automobilindustrie mit europäischen Rohstoffherstellern ein Projekt (PRAVDA) zur werkstofflichen Wiederverwendbarkeit von Kunststoffen aus Altfahrzeugen durch [17]. Dabei wurden die dem jeweiligen Verwertungsbetrieb gelieferten Altkunststoffe mittels IR-Spektrometer identifiziert. Ein manuelles Nachsortieren erfolgte nicht. Bei der Sammlung konzentrierte man sich auf Teile, die bei einer Vielzahl von Herstellern (vgl. Tab. 5.5) in ähnlicher Anwendung aus der gleichen Werkstoff- Familie hergestellt wurden.

**Tabelle 5.5 Mitwirkende Firmen am PRAVDA 2 Projekt**

BASF AG, Bayer AG	Adam Opel AG
Degussa AG, DOW Deutschland	AUDI AG
DSM Du Pont de Nemours GmbH	BMW AG
EniChem GmbH, GEP	Ford-Werke AG
Montell GmbH, Hoechst AG	Daimler-Benz AG
Hüls AG, ICI	Peugeot-Talbot Deutschland GmbH
Monsanto	Dr.-Ing. h.c F.Porsche AG
PCD GmbH	Deutsche Renault AG
Roehm GmbH	Volkswagen AG

Die in die Untersuchung einbezogenen Kunststoffbauteile haben im Durchschnitt ein Gesamtgewicht von 20 kg pro Altfahrzeug (vgl. Tab 5.6) und setzen sich aus Kunststoffkraftstoffbehälter (KKBs), Lüftungskanälen (LFK), Stoßfängerelementen (SFE), Wischwasserbehälter (WWB), Ausgleichsbehälter für Kühler, Konsolen/Innenverkleidungen, Stoßfänger/Außenverkleidungen und diversen Innenteilen zusammen.

**Tabelle 5.6 Werkstoffpotential**

<b>Werkstoffgruppe</b>	<b>Anteil der demontierbaren Bauteile in kg/Fahrzeug (Durchschnitt)</b>
PE	3,0
PP	5,0
ABS	2,0
PA	1,0
PUR-Schaumstoffe	7,0
RIM-Polyurethane	0,2
PMMA	1,4
<b>Kunststoffe im Auto, Gesamtpotential</b>	<b>19,6</b>

### 5.1.2.1 Polyethylen PE

Die vier Altteilefraktionen (Tab. 5.7) wurden jeweils separat durch schreddern und mahlen zerkleinert. Die Korngröße des Mahlguts entspricht der des Buzenmahlguts, wie es beim Blasformen dem Produktionskreislauf zugesetzt wird.

**Tabelle 5.7 Eingesetzte Altteilefraktionen**

Fraktion	Polymertyp
Kunststoffkraftstoffbehälter (KKB)	PE-HD
Luftführungskanäle (LFK)	PE-LD und PP
Stoßfängerelemente (SFE)	PE-LD
Wischwasserbehälter (WWB), Ausgleichsbehälter für Kühler	PE-HD, PP und PA

Die Abtrennung von Straßenschmutz und Material mit Dichte  $> 1\text{g/cm}^3$  geschah mittels Friktionswäscher und einer nachgeschalteten Hydrozyklonstufe. Aufgrund der Beaufschlagung mit Kraftstoffresten (im Versuch zw. 0,4 und 0,8 %) (vgl. Tab. 5.8 [18, S. 6]) ist es bei KKBs erforderlich, diese nach der Demontage zu halbieren und in offenen, belüfteten Behältern zu lagern. Aus Sicherheitsgründen muß der Wert auf  $<0,3\%$  reduziert werden, um die Bildung explosiver Gemische zu vermeiden.

**Tabelle 5.8 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von KKB-Mahlgut und Neuware**

Eigenschaft	Einheit	KKB-Mahlgut	Neuware
MVR (21,6/190)	[g/10 min]	5,4 – 5,9	6,0
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,9448 – 0,9458	0,9450
Asche	[ppm]	270 – 500	<200
Chlor	[ppm]	3 – 20	2
Restkraftstoff	[Gew.-%]	0,35 – 0,83	-
Streckspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]	22,1 – 22,9	24,0
Reißdehnung	[%]	380 – 630	~800
Kerbschlagzähigkeit	[kJ/m <sup>2</sup> ]	154 – 170	190
Spannungsrißbeständigkeit	[h]	>190	300 - 350

Laut BASF benötigte man für die Entgasung, die bei 80 °C aus Explosions-Schutzgründen unter N<sub>2</sub> als Schutzgas durchgeführt wurde, mehrere Stunden. Damit verbunden entsteht ein

erheblicher Kostenaufwand. Nach der Entgasung wurde unter der Zugabe von Additiven (Radikalfänger, Antioxidantien) ein Rezyklatprodukt hergestellt. Daraus hat BMW die Herstellung eines Kraftstoffausgleichsbehälters mit 40 % Neuware erprobt, wobei eine starke Geruchsbelastung auftrat, was eine zusätzliche Absaugeinrichtung nötig machte. Die Prüfung der hergestellten Teile wurde nach Prüfspezifikationen für KKBs vorgenommen, welche voll erfüllt wurden (vgl. Tab. 5.9).

Von RENAULT gibt es Bedenken über die Oberflächenverunreinigungen durch Unterbodenschutz. Falls er nicht während der Aufbereitung entfernt werden kann, könnte er zu Beschädigungen am Extruder und zu reduzierenden mechanischen Kennwerten des Rezyklates führen.

**Tabelle 5.9 Auszug der BMW Laborergebnisse an Bauteilmustern aus KKB-Rezyklat**

Eigenschaft	Sollwert Qualitätsvorschrift 16005	Istwert mit 60 % Rezyklatzusatz
Dichte DIN 53 479 [g/cm <sup>3</sup> ]	9,937 – 0,947	+
Streckspannung DIN 53 455 [N/mm <sup>2</sup> ]	21 – 25	+
Streckdehnung DIN 53 455 [%]	>8	+
E-Modul DIN 53 455 [N/mm <sup>2</sup> ]	670 – 870	+

Damit bleibt festzustellen, daß die Anwendung von KKBs-Rezyklatzugabe technisch möglich ist, jedoch aufgrund des hohen finanziellen Aufwandes (vgl. Tab. 5.10) und unter Gesichtspunkten des Arbeitsschutzes derzeit nicht realisierbar erscheint.

**Tabelle 5.10 Kostenvergleich werkstoffliche Verwertung von Alt-KKB aus PE mit PE-Neuwarepreis [18, S. 6]**

Demontage-/Zerlegekosten	1,05 ± 0,35	DM/kg
Transportkosten	0,40 ± 0,10	DM/kg
Aufbereitungskosten	1,20 ± 0,20	DM/kg
Compoundierkosten	0,60 ± 0,10	DM/kg
Gesamtkosten	3,25 ± 0,75	DM/kg
Gutschrift: Deponiekosteneinsparung	0,15	DM/kg
<b>Kosten für Rezyklat</b>	<b>3,10 (± 0,75)</b>	DM/kg
Neuwarepreis	2,00	DM/kg
<b>Mehrkosten Rezyklat gegenüber Neuware</b>	<b>1,10 (± 0,75)</b>	DM/kg

Laut RENAULT lassen sich die Rezyklate aus Stoßfänger-Prallelementen aus technischer Sicht in der originären Anwendung wieder einsetzen. RENAULT verwendet 100 % Rezyklat aus PE-LD Altprallelementen für die Herstellung der Stoßfänger des Renault Laguna. Dabei erfüllt das Rezyklat die selben Anforderungen wie die Teile aus Neuware.

Bei Scheibenwaschbehälter oder Luftkanälen wurden PP oder PE-Materialien eingesetzt, die sich visuell nicht unterscheiden lassen. Das Kunststoff-Erkennungssystem auf IR-Basis wurde nur stichprobenweise eingesetzt und konnte so ein Vermischen der Materialien nicht verhindern. Das Resultat ist ein praktisch unbrauchbares Rezyklat, sofern auch nur geringe Anforderungen an Festigkeit gestellt werden.

### 5.1.2.2 Polypropylen PP

Die Werkstoffgruppe EMPP (Elastomer-modifiziertes PP) hat in Europa die größte Verbreitung im Bereich Stoßfänger gefunden, und ist zu dem auch gut rezyklierbar [19, S. 569].

Tabelle 5.11 zeigt drei wichtige mechanische Eigenschaften für Stoßfängermaterial, welches von neun unterschiedlichen Fahrzeugtypen stammt. Die Stoßfänger, aus denen die Rezyklate 1 und 2 gewonnen wurden, stammen von bekannten Fahrzeugtypen (Rezyklat 1: aus Stoßfängern von vier Fahrzeugtypen; Rezyklat 2: aus Stoßfängern von 5 Fahrzeugtypen). Rezyklat 3 ist eine zufällige Mischung aus allen Fahrzeugtypen.

**Tabelle 5.11 Vergleich der Spezifikationen für Stoßfängermaterial von 9 Fahrzeugtypen mit drei Rezyklattypen EMPP**

Eigenschaft	Fahrzeugtyp									Rezyklat		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3
E-Modul [kJ/mm <sup>2</sup> ]	630	650	880	880	900	960	1050	1200	1250	850	1070	908
Kerbschlagzähigkeit Izod (-40°C) [kJ/m <sup>2</sup> ]	9.0	12	6.0	7	5.5	5.0	4.5	4.0	4.5	5.5	4.5	6.0
Schmelzindex MFI 230/50 [g/10 min]	8	14	20	15	21	12	13	7	6	27	15	13

Die Qualität der Rezyklate würde für jeweils mindestens eine Spezifikation der Fahrzeugtypen 1 bis 9 ausreichen. Die jeweiligen Chargen variieren jedoch stark hinsichtlich ihrer Eigenschaften. Der Lieferbetrieb müßte demnach chargenweise prüfen ob das Rezyklat die jeweils geforderten Spezifikationen erfüllt. Dies wäre nur mit einem finanziellen Mehraufwand machbar. Für die serienmäßige Herstellung von rezyklathaltigen Stoßfängern

wird deshalb Rezyklat aus sortenreinen Stoßfängern verwendet. Ein Problem stellt hier die benötigte Menge an Altstoßfängern dar, um beim Recycling einen konstanten Mengenstrom zur Verfügung zu haben.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam man beim Projekt PRAVDA. Bei diesem war für PP die Sammlung von Radhausschalen, Stoßfänger und Kühlwasserausgleichsbehälter vorgesehen. Ein Drittel der gesammelten Stoßfänger war in Wagenfarbe lackiert. Die angelieferten Kunststoffteile konnten problemlos zu Mahlgut verarbeitet werden. Fremdteile wurden per Hydrozyklon abgeschieden [17, S. 25].

Die erzielten Materialeigenschaften erreichen nicht die Werte von spezifizierter Stoßfänger-Neuware. Die originäre Anwendung erscheint derzeit noch nicht realisierbar, da sich einerseits durch funktionsbedingte Partikel, wie z.B. Lack, unerwünschte Eigenschaftänderungen ergeben. Andererseits resultieren größere Eigenschaftsschwankungen durch die notwendige Zusammenführung verschiedener PP-Stoßfängertypen, um die geforderten Mengen zu bekommen. Vielen Fahrzeugherstellern (Volkswagen, Renault, Opel, Ford, Audi, BMW) war es möglich, das PRAVDA Stoßfängermahlgut direkt für die Herstellung sog. Radhausschalen zu verwenden. Wegen der Einsparung von Compoundier- bzw. Extrudierschritten ist diese Vorgehensweise aus Kostengründen interessant.

Renault berichtet weiterhin, daß zusammen mit Partnern aus der Zulieferindustrie kürzlich unter Beweis gestellt werden konnte, daß es bei dem Stoßfänger des Renault Megane möglich ist, PP-Stoßfängerware aus Altfahrzeugen und dem Werkstättenbetrieb zu 100% originär einzusetzen. Ermöglicht wurde dies u.a. durch einen speziellen, neu entwickelten Aufbereitungsprozeß, durch den Lackpartikel vollständig entfernt werden. Darüber hinaus wurde der gleiche Farbton und die gleiche Teilequalität wie beim Einsatz von Neuware erzielt. Für den Versuch wurden ausschließlich Renault Altstoßfänger eingesetzt. Obwohl diese aus mehr als sechs unterschiedlichen PP-Granulaten europäischer Hersteller produziert wurden, läßt sich hieraus nicht ableiten, inwieweit sich mit einem Mix auf der Basis aller Altfahrzeuge ähnliche Ergebnisse erzielen lassen.

### 5.1.2.3 Acrylnitril-Butadien-Styrol ABS

Das PRAVDA-Projekt verwendete als Sammelfraktion für ABS, Türablagen, Frontgitter (Kühlergitter), Lenksäulenverkleidungen, Instrumententafeln, Vorderwandabdeckungen, Rammschutzleisten sowie fahrzeugspezifisch Luftauströmer [17, S. 42]. Mit einem Bruker-NIR-Identifikationsgerät (NIR =Nahes Infrarot im Bereich von 700 bis 2500 nm) wurden stichprobenartig die prozentualen Anteile ABS in den gesammelten Kunststoffteilen ermittelt, welcher im Durchschnitt bei 90 % lag. Die Aufbereitung erfolgte über Schredder, Metallabtrennung, mahlen, Naßstufe mit zweistufiger Dichtentrennung (1,00/1,08) im Hydrozyklon und anschließender Trocknung. Aus dem so gewonnenen Mahlgut wurde ein Rezyklat mit 20% Altmaterialanteil hergestellt. Mahlgut und Rezyklat wurden von der

Fa. Bayer AG untersucht, und die gewonnenen Prüfwerte mit jenen von ABS-Neuware verglichen (Tab. 5.12 [17, S. 44]).

**Tabelle 5.12 Materialkennwerte ABS-Neuware, Rezyklat mit 20% Altmaterialanteil und naß aufbereitetes Mahlgut aus Altfahrzeugen**

Eigenschaft	Einheit	ABS Neuware	ABS Rezyklat	ABS Mahlgut
Schlagzähigkeit $a_n$ ISO 180/1C bei RT <sup>1</sup>	kJ/m <sup>2</sup>	148	111	60
Schlagzähigkeit $a_n$ ISO 180/1C bei -40°C	kJ/m <sup>2</sup>	78	60	36
Kerbschlagzähigkeit $a_k$ ISO 180/1A bei RT	kJ/m <sup>2</sup>	19	18	16
Kerbschlagzähigkeit $a_k$ ISO 180/1A bei -40°C	kJ/m <sup>2</sup>	9	8	6
Streckspannung	MPa	42	41	41
Reißfestigkeit	MPa	36	36	37
Reißdehnung	%	42	33	17
Zug-E-Modul	MPa	2260	2260	2260
Erweichungstemperatur Vicat B 50	°C	102	102	100
Härte $H_o$ 30 <sup>4</sup>	MPa	100	99	97
Volumen-Schmelzindex MVR 220°C / 10 kg	cm <sup>3</sup> /10 min	8,3	8,0	7,2
Cd-Gehalt	ppm	0	22	110

<sup>1</sup>Raumtemperatur

Die Ergebnisse zeigen, daß sich ABS werkstofflich zu anspruchsvollen Rezyklaten mit guten mechanischen Eigenschaften aufarbeiten läßt. Das Rezyklat ist für den Wiedereinsatz in Fahrzeugen geeignet. Es können Bauteile für den Nichtsichtbereich bzw. Bauteile mit zusätzlicher Oberflächenbehandlung (Lackierung, Kaschierung) hergestellt werden.

Von den am Projekt beteiligten Firmen konnten aus dem ABS-Rezyklat folgende Bauteile zufriedenstellend produziert werden:

Heckleuchtengehäuse (Opel)  
 Türbox (BMW)  
 Lautsprecheradapter (BMW)  
 Mittelkonsole (MB)  
 Spiegelgehäuse (Renault)  
 Handschuhkasten (Renault)  
 Stoffspiegel Türverkleidung (VW)  
 Türverkleidung (Ford)

Bei einem eigenen Projekt kam man bei VW zu ähnlichen Ergebnissen. Hier wurden die Materialeigenschaften von ABS beim sortenreinen Recycling von sechs Jahre alten, gebrauchten VW-Kühlergrillen bestimmt (vgl. Tab. 5.13).

**Tabelle 5.13 Materialeigenschaften von ABS beim sortenreinen Recycling von VW-Kühlergrillen [19, S.570]**

Eigenschaft	Einheit	ABS Neuware	20% Rezyklatgehalt	50% Rezyklatgehalt
Schlagzähigkeit $a_n$ ISO 180/1C bei RT	$\text{kJ/m}^2$	167	159	153
Schlagzähigkeit $a_n$ ISO 180/1C bei $-40^\circ\text{C}$	$\text{kJ/m}^2$	78	71	61
Kerbschlagzähigkeit $a_k$ ISO 180/1A bei RT	$\text{kJ/m}^2$	27	25,1	23,7
Kerbschlagzähigkeit $a_k$ ISO 180/1A bei $-40^\circ\text{C}$	$\text{kJ/m}^2$	11,1	10,6	9,9
Kugelfallversuch <sup>1</sup> bei RT		zäh-spröd	zäh-spröd	zäh-spröd
Erweichungstemperatur Vicat B 120	$^\circ\text{C}$	106	107	106
Volumen-Schmelzindex MVI $220^\circ\text{C}$ / 10 kp	$\text{cm}^3/10 \text{ min}$	3,7	3,5	3,6

<sup>1</sup>Beurteilung anhand des Bruchbildes



Die Kosten für ein ABS-Rezyklat würden aber den Preis für eine entsprechende Neuware übersteigen. Dies bedeutet, daß ein wirtschaftlicher Kreislauf über die Demontage von ABS-Teilen aus Altfahrzeugen derzeit nicht realisierbar ist (vgl. Tab. 5.14).

**Tabelle 5.14 Rezyklatkosten für 100 % ABS-Altmaterial [17, S. 49]**

Vorgang	DM/kg Einzelpreis	DM/kg Mahlgut	DM/kg Rezyklat <sup>1</sup>
Demontage und Sortierung	0,50-1,00		
Lagerung und Transportlogistik	0,40-0,60		
Einsparung Entsorgungskosten Verwerter	-0,60-0,10		
Bereitstellung Altmaterial gesamt		0,30-1,50	0,40-1,80
Aufbereitung im Naßverfahren	1,00-1,50		
Entsorgungskosten Fehlmaterial (18 %)	0,10-0,20		
Aufbereitung gesamt		1,10-1,70	1,30-2,00
Regranulieren mit Schmelzefilter	0,80		
QS <sup>2</sup> , Verpackung, Transport	0,30		
Compoundierung und Versand gesamt			1,10
<b>Gesamt Rezyklatkosten 100 % Altmaterial<sup>1</sup></b>			<b>2,80-4,90</b>

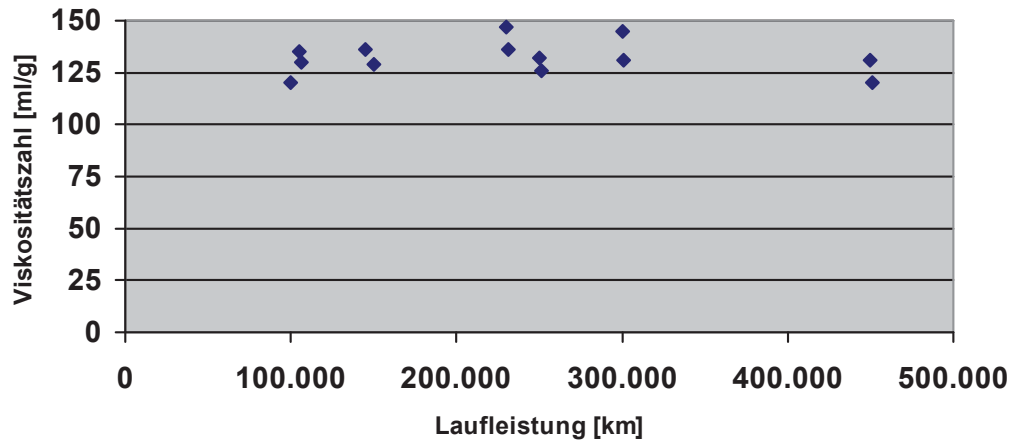
<sup>1</sup>Für die Herstellung von Rezyklaten unter Zusatz von Neuware sind neben anteiligen Kosten für die Rohstoffe (Neuware, Additive etc.) zusätzliche Kosten für Logistik, Transport und Handling anzusetzen.

<sup>2</sup>Qualitätssicherung

#### 5.1.2.4 Polyamid PA

Für Kühlwasserkästen, Radblenden, Spiegelgehäuse und Lüfterzargen wird allgemein glasfaserverstärktes Polyamid PA 66 eingesetzt. Bei Kühlwasserkästen handelt es sich unter dem Gesichtspunkt der Wiederverwertung um einen Glücksfall, da herstellerübergreifend immer ausschließlich PA 66 eingesetzt wurde. Dabei liegt nicht nur eine sortenreine, sondern auch eine typenreine Anwendung mit stets 30 Gew.-% Glasfasern vor [15, S.146]. Auch für das Projekt PRAVDA wurden diese Teile für die Polyamidfraktion ausgewählt und gesammelt.

Obwohl an das Material (z.B. LKW-Kühlwasserkästen) sehr hohe Anforderungen wie Laufleistungen von mehr als 450.000 km gestellt werden, sind keine signifikanten Veränderungen (z.B. Viskositätszahl) nach dessen Gebrauch feststellbar (Abb. 5.5) [19, S. 568].



**Abbildung 5.5 Recycling gebrauchter LKW-Kühlwasserkästen – Viskosität von Polyamid 66-Rezyklat (Glasfaseranteil GF 30%, wärmestabilisiert) in Abhängigkeit von der LKW-Laufleistung [19, S. 568]**

Bei PRAVDA wurde das gereinigte Mahlgut im Verhältnis 1 : 3 mit neuem PA 66 verschnitten, auf 30% Glasfaseranteil eingestellt und anschließend schwarz eingefärbt. Die Werte der werkstofflichen Prüfung (vgl. Tab. 5.15 und Tab. 5.16) des so gewonnenen Rezyklates zeigen, dass es prinzipiell möglich ist Polyamid-Teile aus Altfahrzeugen für die Herstellung hochwertiger Rezyklate einzusetzen.

**Tabelle 5.15 Vergleich von PA-Rezyklat und Neuware, Granulat-Prüfung**

Eigenschaften und Prüfnormen Granulat-Prüfung				PA 66 + 30% GF <sup>1</sup> wärmestabilisiert , schwarz + 30% Mahlgut aus Altteilen	Ultramid A3WG 6 Schwarz 564
Eigenschaft	Einheit	DIN	ISO	Einzelwert	Mittelwert
MVR 275°C 5kg/4min	cm <sup>3</sup> /10min		1133	31	35
Modifiziergehalt	%			3,0	0
Extraktgehalt (CH <sub>3</sub> OH)	%			0,75	*)
DSC <sup>3</sup> Tm1	°C		3146	263,0	*) (262,9)

DSC Tm2	°C		3146	260/250,3	*) (262,1/253,2)
DSC Tkm	°C		3146	225,1	*) (230,4)
DSC Tkb	°C		3146	231,0	*) (236)
HwB	°C		3146	3,3	*) (4,7)
mittlere Glasfaserlänge	µm			243	232
Aschegehalt	%	EN 60		27,9	30,2
VZ (korr)	cm <sup>3</sup> /g	53727	307	151	138

\*) nicht geprüft im Rahmen der Chargenkontrolle. Werte in Klammern sind Einzelmessungen

<sup>1</sup>Glasfaser

<sup>2</sup>Volumen-Schmelzindex

<sup>3</sup>Schmelzpunkt

Eine hinreichend saubere Sortierung der angelieferten Teile konnte nur in einigen Großbetrieben erreicht werden. Zur Verbesserung dieser Situation müßte geprüft werden, ob die NIR-Erkennungstechnik mit ihren kurzen Ansprechzeiten, aber ihren Einschränkungen in der Erkennung rußpigmentierter Polymere zu einem besseren Ergebnis führt.

**Tabelle 5.16 Vergleich von PA-Rezyklat und Neuware, Prüfung an Prüfkörpern [17,S. 56]**

Eigenschaften und Prüfnormen Granulat-Prüfung				PA 66 + 30% GF <sup>1</sup> wärmestabilisiert , schwarz + 30% Mahlgut aus Altteilen	Ultradid A3WG 6 Schwarz 564
Eigenschaft	Einheit	DIN	ISO	Einzelwert	Mittelwert
mittlere Glasfaserlänge	µm			212	234
Aschegehalt	%	EN 60		28,5	30,1
VZ (korr)	cm <sup>3</sup> /g	53727	307	154	140
Zug E-Modul	tr	53455	527	9004	10050
	f	53457	527	6487	7100
Bruchspannung	tr	53455	527	176	185
	f	53455	527	109	124
Bruchdehnung	tr	53455	178	3,3	3,0
	f	53455	178	6,1	5,0
Biege-E-Modul	tr		178	7607	8730
	f		178	5166	6430

Randfaserdehnung	tr	%		178	4,2	3,7
beim Bruch	f			178	6	5,7
Biegespannung	tr	N/mm <sup>2</sup>		178	251	263
beim Bruch	f			178	172	211
Schlagzähigkeit +23°	tr	kJ/m <sup>2</sup>		179/1eU	3,074,1	064,1
	f			179/1eU	83,3	*)

\*) nicht geprüft im Rahmen der Chargenkontrolle. Werte in Klammern sind Einzelmessungen

In Zukunft dürfte der Anteil an Polyamid in Fahrzeugen weiter ansteigen. Immer mehr Teile des Motorenraumes, die bislang aus Polypropylen gefertigt wurden (z.B. Luftfilter, Abdeckungen), werden wegen der erhöhten Temperaturbeständigkeitsanforderungen aus Polyamid hergestellt. Anstelle von Aluminium werden in neuen Motoren Ansaugrohre aus glasfaserverstärktem Polyamid verwendet [17, S. 55].

### 5.1.2.5 Polymethylmetacrylat PMMA

Absolute Farblosigkeit, hohe Brillanz, hohe Oberflächenhärte, große Steifigkeit, gute Chemikalienresistenz und ausgezeichnete Witterungsbeständigkeit eröffnen PMMA (auch Acrylglas genannt) viele Einsatzgebiete [19, S. 497]. Wegen seines hohen Preis wird PMMA bevorzugt für langlebige Produkte verwendet.

In der Fahrzeugtechnik wird PMMA hauptsächlich für Lichtscheiben von Blink- und Heckleuchten verwendet. Beim Projekt PRAVDA wurden die kompletten Bauteile (Lichtscheibe, Reflektor und Gehäuse) gesammelt und versucht, daraus ein Rezyklat für Anwendungen im Fahrzeugbau herzustellen. Da die Polymere PMMA (Lichtscheibe) und ABS (Gehäuse) sehr gut miteinander verträglich sind war vorgesehen ein PMMA/ABS-Rezyklat über die Aufbereitungsschritte Vor-/ Aufschlußzerkleinerung, Trockensortierung, naßmechanische Aufbereitung und Trocknung zu gewinnen. Fremdpolymere wie PP oder PA wurden zuvor mit einem Infrarot-Detektor aussortiert, da sie erfahrungsgemäß die Qualität eines PMMA/ABS-Blends erheblich beeinträchtigen würden [17, S.58]. Reines PMMA selbst, würde bei Vermischungen aufgrund von mangelnder Löslichkeit oder Brechungsindexunterschieden anderer Polymere in PMMA sofort die Transparenz verlieren und eine opake Farbe annehmen [19, S.498]. Durch die Aufbereitung konnte bei PRAVDA PMMA/ABS mit einer Reinheit von 99,7%, einer Restfeuchte von < 0,5% und einer Korngröße von < 8 mm gewonnen werden.

Das Mahlgut wurde in einer weiteren Aufbereitungsstufe zu Granulat verarbeitet und das Eigenschaftsspektrum bestimmt (vgl. Tab.5.17).

**Tabelle 5.17 Materialeigenschaften von ABS+PMMA Rezyklaten [17, S.60]**

Eigenschaften	Einheit	PRAVDA 1 <sup>1</sup>	PRAVDA 2 <sup>2</sup>	PRAVDA Compound <sup>3</sup>	Prüfnorm
<b>Mechanische Eigenschaften</b>					
Zugfestigkeit	MPa	68	59	50	ISO 527
Bruchdehnung	%	3,5	6,0	5,5	ISO 527
Elastizitätsmodul	MPa	3170	3130	2780	ISO 527
Schlagzähigkeit (Charpy)	23°C	2,7	2,8	4,8	ISO 1781eU
	0°C	2,5	2,1	3,4	
Kerbschlagzähigkeit (Izod)	23°C	2,7	2,8	4,8	ISO 180/1A
	0°C	2,5	2,1	3,4	
<b>Thermische Eigenschaften</b>					
VST-B/50	°C	106	105	103	ISO 308
MVR (230/3,8)	cm <sup>3</sup> / 10 min	2,28	2,66	2,82	ISO 1133

<sup>1</sup>PMMA/ABS-Rezyklat, filtriert und granuliert

<sup>2</sup>PMMA/ABS-Rezyklat, filtriert und granuliert

<sup>3</sup>PMMA/ABS-Rezyklat mit ABS-Primärware compounding

Die ermittelten Eigenschaften bieten gute Einsatzmöglichkeiten im Fahrzeugbau, insbesondere für den Einsatz in Abmischungen mit ABS-Neuware. Die Schwachpunkte niedrige Reißdehnung und Zähigkeit vom PRAVDA-Mahlgut konnten durch Zumischen von ABS-Neuware deutlich verbessert werden.

BMW testete den Einsatz von PMMA/ABS-Rezyklat für den Heckleuchtenreflektor der BMW 5er Reihe. Der Compound erfüllte sämtliche Anforderungskriterien, die für BMW-Heckleuchten aufgrund des weltweiten Einsatzes auch unter schwierigen klimatischen Bedingungen extrem hoch sind. Deshalb wurde die Freigabe zur Herstellung des Reflektors aus PMMA/ABS-Rezyklat erteilt und diese Rezyklatanwendung in Serie umgesetzt [4, S.270].

Bei der Kostenbetrachtung erhält man ohne Demontage-, Logistik-, Transport- und sonstige Nebenkosten Rezyklatkosten von 2,60 – 3,30 DM/kg, ohne weitere ggf. notwendige Modifizierungen. (Für die dabei notwendige mechanische Aufbereitung rechnet man mit 1,50 – 1,80 DM/kg, für die Compounding mit 1,10 – 1,50 DM/kg.) Nach entsprechender Modifizierung würde dies Rezyklatkosten mindestens in der Höhe des Neupreises für handelsübliche PMMA/ABS-Blends ergeben [17, S.60].

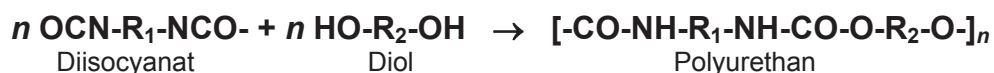
### 5.1.3 Duroplaste

Die Unschmelzbarkeit duroplastischer Werkstoffe steht einer unmittelbaren stofflichen Verwertung durch Umschmelzen entgegen. Die eingesetzten Werkstoffe setzen sich aus Harz, Härter, Füll- und Verstärkungsstoffen zusammen. Die Füll- und Verstärkungsstoffe stellen hierbei beträchtliche Mengenanteile dar, die bis zu 80 Gew.-% an der gesamten Zusammensetzung des Werkstoffs betragen können [20]. Diese Tatsache wird bei Duroplasten zur stofflichen Verwertung als Partikelrecycling verwendet. Da zur Herstellung von Duroplasten (Neuware) ohnehin Füllstoffe (Mineralstoffe, Holz- und Zellulosefasern) benötigt werden, wird ein Teil dieser Füllstoffe durch feingemahlene Duroplastpartikeln ersetzt.

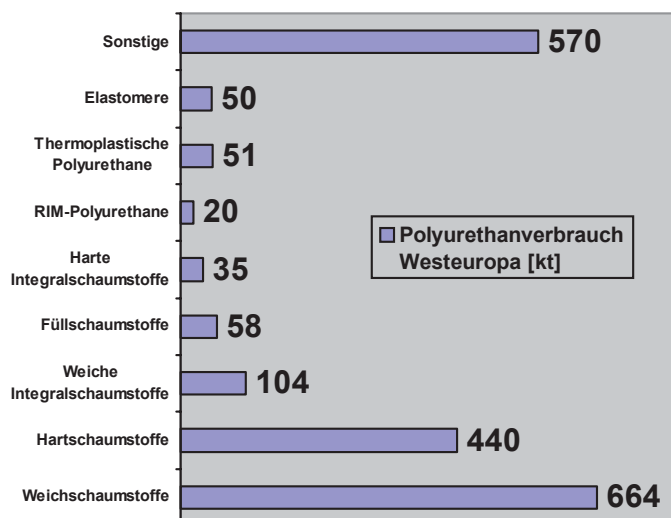
Die stoffliche Verwertung von Duroplasten im Fahrzeugbau beschränkt sich im wesentlichen auf die Verwertung von Teilen aus Polyurethan PUR und glasfaserverstärkten Kunststoffen (GfK).

### 5.1.4 Versuchs/Projektergebnisse

Polyurethane stellen eine Klasse von Polymeren dar, die durch Polyaddition von Polyisocyanaten mit Polyolen gewonnen werden [21, S. 591].



Polyurethane stellen eine ganze Familie von Spezialkunststoffen dar (vgl. Abb. 5.6). Aus der Fahrzeugindustrie werden vor allem Weichschaumstoffe und RIM-Polyurethane (Reactive Injection Moulding) in größeren Mengen für ein Recycling gewonnen.



Sonstige = Kleber, Lacke und Beschichtungen, Dichtmassen, Fasern

Abbildung 5.6 Polyurethanverbrauch 1991 in Westeuropa [19, S. 747]

### 5.1.4.1 PUR-Weichschaumstoffe

Im Projekt PRAVDA wurden PUR-Weichschaumstoffe aus Sitzen von Automobilen gesammelt und verarbeitet. Alle Teile waren stark gealtert, vergilbt und verschmutzt. Als nicht abtrennbare Fremdstoffe wurden Textilien, Vliese, Gummihaar, Jutegewebe und Papier von Etiketten festgestellt. Als sehr störend zeigte sich das Fehlen eines maschinellen Entferungsverfahren für Drahteinlagen. Diese mußten per Hand herausgelöst werden.

Die Herstellung von Weichschaumflockenverbund ist die älteste Methode für die Verwertung von Polyurethanen. Dabei werden PUR-Flocken oder -Granulat mit einem Binder beleimt und in Pressen miteinander verklebt. Polyisocyanate und Polyurethane sind geeignete Bindemittel um Partikel unter Anwendung von Preßdruck zu binden.

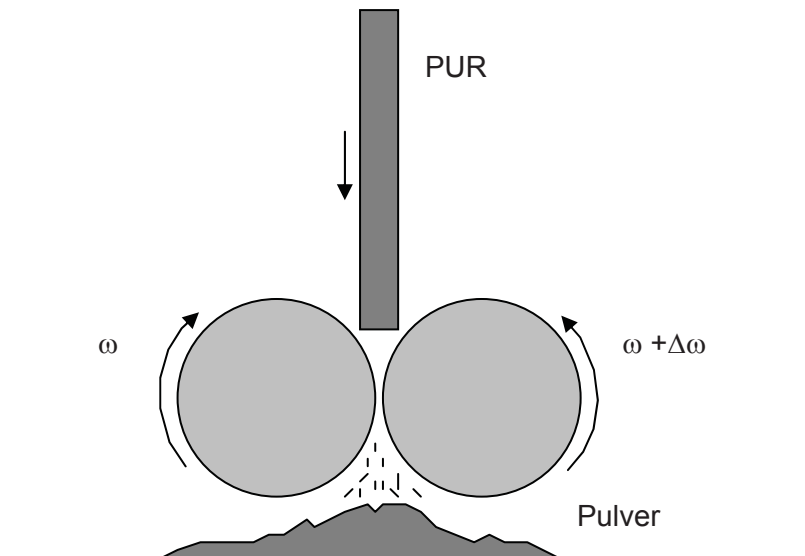
Flockenverbundschaumstoff ist kein minderwertiges Material. Er hat Eigenschaften, deren Werte zum Teil über den des Ausgangsmaterials liegen (vgl. Tab. 5.18) [19,S. 752].

**Tabelle 5.18 Typische Eigenschaften von Flockenverbundschaumstoffen**

Eigenschaft	Standardtypen	Spezialtype mit höherer Härte
Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	60 bis $300 \pm 20$ %	$60 \pm 20$ %
Stauchhärte, 40 % [kPa]	5 bis $160 \pm 20$ %	$10 \pm 20$ %
Zugfestigkeit [kPa]	min. 32 bis min. 390	min. 40
Bruchdehnung [%]	min. 55 bis min. 60	min. 50

Ein enormer Markt für Flockenverbund besteht in den USA in Form von Teppichrücken. Dort sind extrem weiche, dicke Teppichböden sehr beliebt, für die der Verbund optimale Eigenschaften liefert [10, S.229]. In Europa werden derzeit im Jahr bis zu 20.000 Tonnen für Kopf- und Armstützen, Schallisierungen, Turnmatten und Büromöbel eingesetzt [17, S. 65].

Eine andere Möglichkeit der Wiederverwertung von Weichschaumstoffen ist die Mitverwendung von pulverisiertem Schaumstoff bei der Herstellung neuer Schaumstoffe. Insbesondere Weichschaum ist bedingt durch seine Elastizität und der geringen Dichte sehr schwierig zu zerkleinern. Bisher wurde dafür die Kryotechnik angewendet, mit der das Material zum Zerkleinern stark abgekühlt und somit versprödet wurde. In jüngster Zeit hat die Fa. Bayer ein Verfahren entwickelt, das es gestattet, die PUR-Weichschaumstoffe bei Raumtemperatur über eine Walzenanlage zu feinstem Pulver zu zermahlen (Abb. 5.7). Diese Technik, das sogenannte Walzmahlen, arbeitet mit zwei gegenläufigen Metallwalzen, die sich mit leicht unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten drehen. Dabei wird der Schaumstoff automatisch eingezogen und zwischen den Walzen unter definierter Scherung zerrissen [10, S. 224].

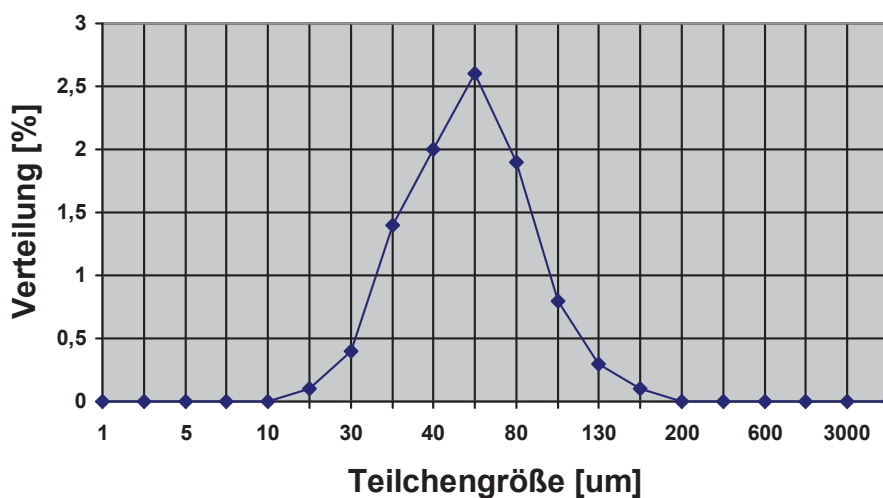


**Abbildung 5.7 Prinzip des Walzmahlverfahrens**

Die Vorteile dieses Verfahrens sind [17, S. 70]:

- der Weichschaumstoff braucht nicht gekühlt zu werden
- das Verfahren hat einen hohen Durchsatz
- das Verfahren ist sehr leise
- das Verfahren ist für die Walzen nahezu verschleißfrei
- das Verfahren erlaubt einen kontinuierlichen Betrieb
- das Verfahren verspricht preisgünstig zu sein
- das Pulver ist sehr fein

(Maximum der Teilchengröße liegt bei ca. 60  $\mu\text{m}$ , vgl. Abb. 5.8).



**Abbildung 5.8 Teilchengrößenverteilung von PUR-Weichschaumpulver, hergestellt durch Walzmahlen [10, S. 225]**

Bis zu 30 Teile Pulver (bezogen auf 100 Teile Polyol) entsprechend 18 Gew.-% Pulver im Fertigteil ist möglich [17, S.71]. Die daraus ermittelten Eigenschaften (vgl. Tab. 5.19) können mit den gängigen Automobilspezifikationen als konform betrachtet werden.



**Tabelle 5.19** Typische Eigenschaften von Formschaumstoffen mit und ohne Mahlguteinarbeitung [19, S.754]

Eigenschaft	Kaltschaumstoff (MDI)			Heißschaumstoff (TDI)		
	Standard	mit 15% Mahlgut	Spezifikation	Standard	mit 15% Mahlgut	Spezifikation
Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	70	64	65 ± 5	30	30	30 ± 5
Eindruckhärte, 40% [kPa]	2,7	2,8	ca. 3,5	-	-	-
Eindruckhärte, 50% [kPa]	-	-	-	3,6	3,1	ca. 3,5
Zugfestigkeit [kPa]	106	92	>80	128	140	>120
Bruchdehnung [%]	147	102	>100	183	193	>130
DVR <sup>1</sup> , bei 50% Kompression [%]	6,8	9,5	<6	-	-	-
DVR <sup>1</sup> , bei 70% Kompression mit Haut [%]	-	-	-	5,4	12,5	<20
Weiterreißfestigkeit [N/cm]	2,1	2,2	>2	-	-	-
Härteänderung <sup>2</sup> [%]	-	-	-	-17,5	-16,5	< -25
Höhenänderung <sup>2</sup> [%]	-	-	-	-1	-2	< -5
DVR <sup>1,2</sup> [%]	-	-	-	4,5	9,6	<30

<sup>1</sup>Druckverformungsrest<sup>2</sup>nach Dauerschwingversuch

Es sei bemerkt das bei der Verarbeitung einer Pulver-Polyol-Mischung eine Veränderung des Reaktionsverhaltens der Rohstoffkomponente und der Stabilität bei der Verschäumung im Zeitraum von mehreren Tagen feststellbar ist. Analytische Untersuchungen (im Zuge des Projektes PRAVDA) haben ergeben, daß diese Phänomene durch Absorption von Wasser an der Pulveroberfläche, sowie durch Diffusion von Inhaltsstoffen aus dem Altmaterial hervorgerufen werden. Bei der Verarbeitung der Mischung innerhalb weniger Stunden können diese Einflüsse jedoch vernachlässigt werden [17, S.72].

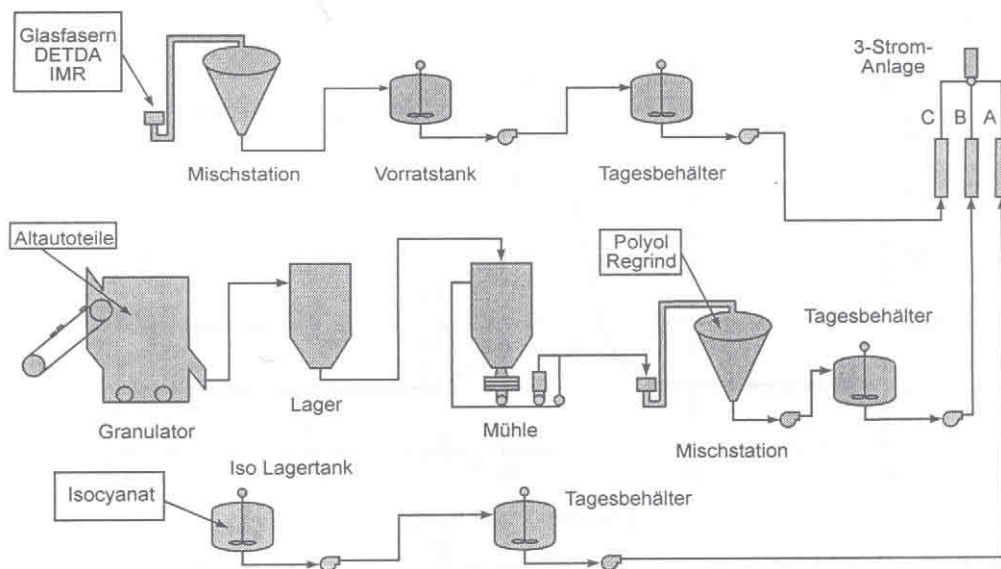
### 5.1.4.2 RIM-Polyurethane

Der Reaktionsschaumguß RSG, auch Reaktionsspritzguß genannt, ist in der USA als RIM-Technology (= Reactive Injection Moulding) bekannt [22, S.297].

Aus Gründen der erhöhten Wärmeformbeständigkeit werden in der RIM-Technik keine reinen Polyurethan-Systeme, sondern Polyurethan-Polyharnstoff-Systeme eingesetzt. Hierzu ist die Zugabe eines Aminvernetzers erforderlich. Zumeist wird Diethyltoluylendiamin (DETDA) eingesetzt [10, S. 225]. Gebräuchliche Verfahren zum Recycling von RIM sind die Füllstoff-Methode und das Fließpressen. Beim Klebpressen können zwar RIM-Alteile aus Fahrzeugen eingesetzt werden, doch findet man in der Literatur keinerlei Beispiele, für den Wiedereinsatz in Fahrzeugen, von so rezykliertem RIM-Kunststoff. Das Verfahren läßt sich mit dem sog. Flockenverbund bei PUR-Weichschaumstoffen vergleichen.

#### Füllstoff-Methode:

Nachteilig bei der Verwendung von Mahlgut ist, daß der Vernetzer DETDA von dem Mahlgut aufgesogen wird und es somit zu einer Mischungsverschiebung kommt. Beim anschließenden Lackieren diffundiert das aufgesogene DETDA wieder aus, was zu Verfärbungen an Oberflächen führen kann [17, S. 78]. Um auch im RIM-Verfahren Mahlgut einsetzen zu können, ist somit eine Trennung von DETDA und Mahlgut erforderlich. Hieraus entwickelte sich die sogenannte Drei-Strom-Technik (Abb. 5.9).



**Abbildung 5.9** Ablaufdiagramm eines Drei-Strom-RIM-Prozesses

Bei dieser Technik wird der Polyolstrang in zwei Teilstränge aufgespalten. Der eine Strang enthält nach wie vor das Polyol, Glasfasern (wenn gewünscht, für glasfaserverstärktes RRIM-Polyurethan; heute werden auch Wollastonitfasern, plättchenförmige Glasflakes oder Kohlenstofffasern eingesetzt [23, S.138]) und den Aminvernetzer DETDA. In einem weiteren

Polyolstrang wird Polyol und Mahlgut eingesetzt. Die Verarbeitung erfolgt dann mit Drei-Strom-Mischköpfen.

Mit dieser Technik können maximal 30 Gew.-% Füllstoff im Endteil eingesetzt werden. Hierbei ist zu beachten, daß in diesen 30 Gew.-% auch die dem Polyol zugesetzten Glasfasern enthalten sind. Typischerweise werden RIM-Formteile mit einem Fasergehalt von 17 bzw. 22 Gew.-% hergestellt, so daß tatsächlich nur noch 13 Gew.-% bzw. 8 Gew.-% Mahlgut zugegeben werden dürfen [10, S. 226]. Die mechanischen Werte der daraus hergestellten Bauteile sind mit und ohne Mahlgut-Füllstoff identisch (vgl. Tab. 5.20 [17, S. 79]). Auch läßt sich die Oberfläche der unlackierten oder lackierten Teile nicht von denen, die ohne Pulverfüllstoff hergestellt wurden, unterscheiden [17, S. 79].

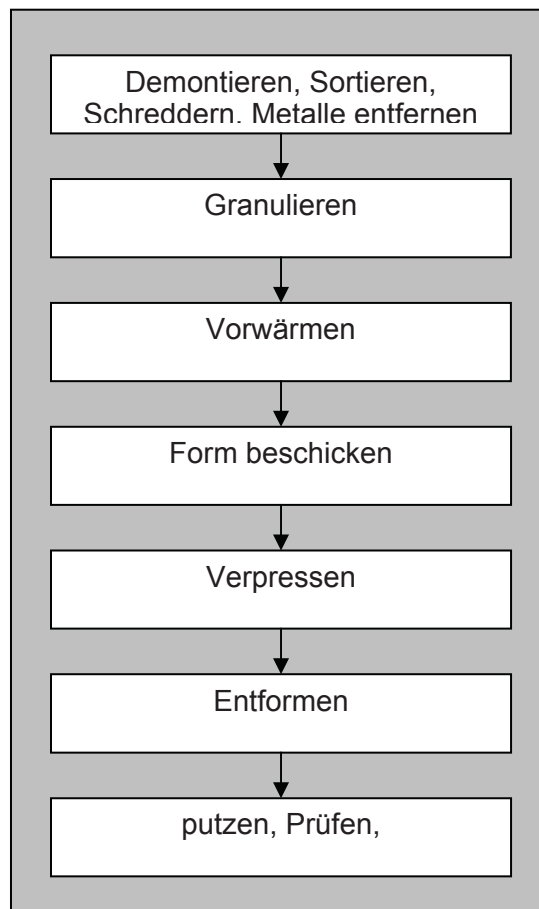
**Tabelle 5.20 Vergleich mechanischer Eigenschaften einer Stoßfängerverkleidung aus 100%-iger Neuware (A) mit einer Stoßfängerverkleidung die 10 % Füllstoff in Form von gemahlene lackierten Stoßfängern enthält (B)**

Eigenschaft	Einheit	A	B	
Mahlgut-Füllstoff	%	-	10	
Shore D-Härte		52	51	
Biege-E-Modul	MPa	+25°C	348	359
		+70°C	149	197
		-29°C	890	869
Bruchdehnung	%	210	190	
Zugfestigkeit	MPa	26	24	
Sag-Wert 150mm/121°C/1h	%	21	19	
Längenänderung 240h/H <sub>2</sub> O/25°C	%	0,52	0,53	
Ausdehnungskoeffizient a.10 <sup>-6</sup>	K <sup>-1</sup>	+66°C	1551	153
		+121°C	6113	160
		-40°C	8	139

#### Fließpressen:

Das Fließpressen ist eine Technik, die von der Firma Bayer entwickelt wurde. Der prinzipielle Verfahrensablauf ist in Abb. 5.10 dargestellt. Das granuliert Altmaterial wird zunächst bei ca. 150 °C vorgewärmt und anschließend in eine auf ca. 190 °C temperierte Form gegeben. Unter sehr hohem Druck wird das Granulat zu einem Formteil gepreßt. Polyurethane als vernetzte, nicht aufschmelzbare Kunststoffe zu neuen Formteilen zu verpressen, widerspricht zunächst dem Verständnis für vernetzte Polymere in der Kunststoffverarbeitung. Durch die hohen Temperaturen und den extrem hohen Druck gelingt es aber bei diesem

Verfahren, vorhandene Bindungen aufzutrennen, die nach dem Fließpreßvorgang wieder an anderer Stelle geschlossen werden [10, S 227].



**Abbildung 5.10 Fließpreßverfahren für PUR-RIM-Formteile**

Das Fließpressen ist das einzige Verfahren, das eine nahezu 100%-ige Recyclingquote bei höchstem Eigenschaftserhalt aufweist. Es benötigt keinerlei Additive und Hilfsmittel. Das Rezyklat wird auch nicht mit Neeware vermischt. Die RIM- und RRIM-Polyurethane können lackiert oder unlackiert sein. Es lassen sich sowohl Produktionsreststoffe als auch gebrauchte Altteile verwenden. Anhand der Eigenschaften eines daraus hergestellten Fließpreßteils kann nicht festgestellt werden, ob das Teil aus frischem Produktionsabfall oder aus Altteilen hergestellt wurde. Die Eigenschaften sind gleich [17, S.76].

Bemerkenswert ist auch der hohe Eigenschaftserhalt der Fließpreßteile, verglichen mit der Neeware. Zu diesem Ergebnis kam man auch beim ersten Automobil-Serienteil, einer Abdeckung für die Heckentlüftung des BMW 850 i (vgl. Tab. 5.21). Als Ausgangsmaterial diente ein Gemisch aus zwei RRIM-Polyurethanen mit 15 bzw. 20 Gew.-% Glas. Diese stammen aus alten Stoßfängern [19, S. 757].

**Tabelle 5.21 Abdeckung Heckentlüftung des BMW 850 i, Vergleich Originalteil (Gemisch aus lackierten Teilen mit 15 bzw. 20% Glasfasern, lackiert) mit fließgepreßtem Teil aus Granulat (0,2-0,5 mm)**

Eigenschaft	Einheit	RRIM Originalteil (lackiert)	Heckentlüftung des BMW 850 i
Dichte	kg/l	1,20	1,24
Shore D-Härte		60-62	65
Biege E-Modul	MPa	700-1000 <sup>1</sup>	622
Zug E-Modul	MPa	600-800	507
Bruchdehnung	%	170-200	250
Zugfestigkeit	MPa	24-28	26

<sup>1</sup>längs der Faserrichtung gemessen

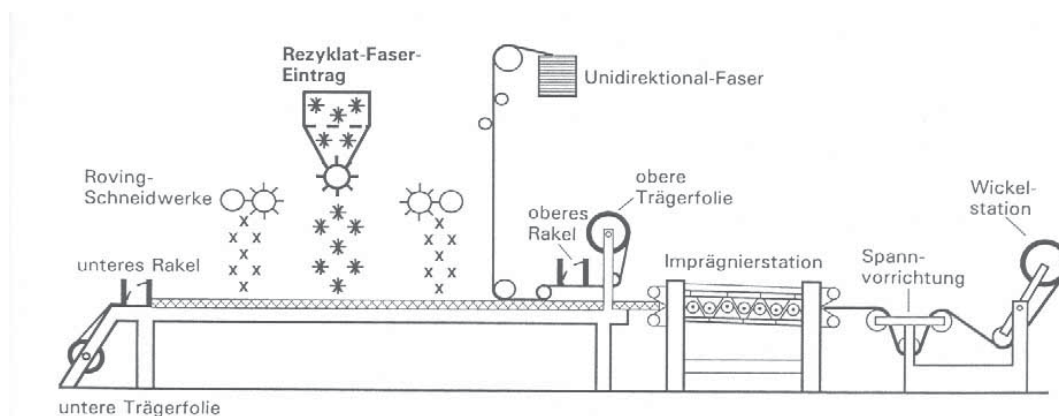
Die besten Fließpreßergebnisse erhält man bei der Verwendung von feinem Granulat mit einer Korngröße von 0.5-1.5 mm. Besonders Mahlgut der Siebfraktion 0.2 bis 1 mm ergibt eine hohe Oberflächenqualität. Es kann jedoch auch Grobkorn > 1,5 mm verpreßt werden. Das erhaltene Mahlgut wird auf ca. 140-150°C vorgeheizt und dann in ein vorgeheiztes Stahlwerkzeug mit Tauchkanten eingebracht. Das Mahlgut darf thermisch nicht zu sehr vorbelastet werden, da sonst das Material altert und nicht mehr fließpreßfähig ist. Das Werkzeug ist auf 180-190°C geheizt. Mit einem Druck von > 350 bar wird es innerhalb einer bis zwei Minuten zu einem neuen Artikel gepreßt. Durch das ausgeprägte Fließvermögen sind auch Hinterschnitte und vertikale Werkzeugabschnitte kein Problem. Die Artikel sind frei von inneren Spannungen [17, S.76].

### 5.1.4.3 Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sind gewöhnlich Duroplaste. Sie bestehen aus einem Gemisch aus Harzen, mineralischen Füllstoffen, Glasfasern und einer Reihe von Additiven, wie z. B. Eindickungs-, Trenn- und Gleitmittel. Die verstärkenden Fasern sind primär Glasfasern, in begrenztem Umfang werden auch Kohlenstoff und textile Fasern verwendet [19, S. 771]. Typisch sind sog. SMC-Harzmatten (Sheet Moulding Compound – flächenförmig) und BMC-Formmassen (Bulk Moulding Compound – nicht flächenförmig).

Für das Partikelrecycling werden die Altteile gesammelt, und mittels Schneckenzerkleinerer, Schneid- oder Hammermühlen (geringerer Verschleißes beim Zerkleinern der abrasiv wirkenden Fasern) zerkleinert. Die Aufteilung in die Grob- (>0,5 mm) und die Feinfraktion erfolgt mit Hilfe eines Windsichters und Sieben unterschiedlicher Maschenweite [10, S.205]. Feine, pulverförmige Rezyklat-Fractionen können als Füllstoff in die SMC-Paste eingearbeitet werden, wobei das Rezyklat einen Teil des meist verwendeten Füllstoffes Kreide ersetzt. Wegen der im Vergleich zum Füllstoff geringeren Dichte von Rezyklat (Dichte von  $\text{CaCO}_3$  2,7  $\text{g/cm}^3$ , Dichte SMC-Rezyklat 1,7 bis 2  $\text{g/cm}^3$ ) wird je nach Rezyklatanteil die Dichte des SMC wesentlich verändert [19, S. 772]. Es ist hierbei zu beachten, daß die Mengenzugabe des substituierenden Rezyklats volumenanteilmäßig bezogen auf das  $\text{CaCO}_3$  vorzunehmen ist, da sonst die Paste einen zu geringen Harzanteil aufweisen würde. Eine vollständige Substitution der Kreide ist bisher nicht möglich [10, S. 207].

Wirtschaftlicher ist jedoch der Einsatz größerer Partikel (im Austausch zu Neuglasfasern) mit Hilfe einer modifizierten SMC-Mattenanlage (Abb.5.11) [19, S.775].



**Abbildung 5.11 Neues SMC-Verfahren für das Aufstreuen der Rezyklat-Grobfraktion**

Das Einbringen der Rezyklat-Grobfraktion erfolgt zwischen den, durch Schneidwerke aufgearbeiteten Neuglasfasern, wodurch ein symmetrischer Aufbau von Verstärkungsfasern und Faserfraktionen entsteht. Die Aufstreuerung der Rezyklate erfolgt über rotierende Bürstenverteiler, wie sie auch in der Spanplattenindustrie Verwendung finden. In der Imprägnierstation werden die Fasern mit Harz getränkt.

Die mechanischen Eigenschaften von SMC sind von der Harzzusammensetzung und der Faserverstärkung abhängig. Bei geeigneter Abstimmung kann ein Recycling-SMC das gleiche Eigenschaftsprofil aufweisen wie SMC aus Rohstoffneeware. So liegen der Zug-E-Modul, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung bei Rezyklatanteilen bis etwa 20 Gew.-% auf dem gleichen Niveau wie bei einem konventionellen SMC. Lediglich der Biege-E-Modul wird durch die Zugabe von Rezyklaten reduziert, und die Randfaserdehnung wird entsprechend erhöht. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Rezyklatpartikel aufgrund ihrer

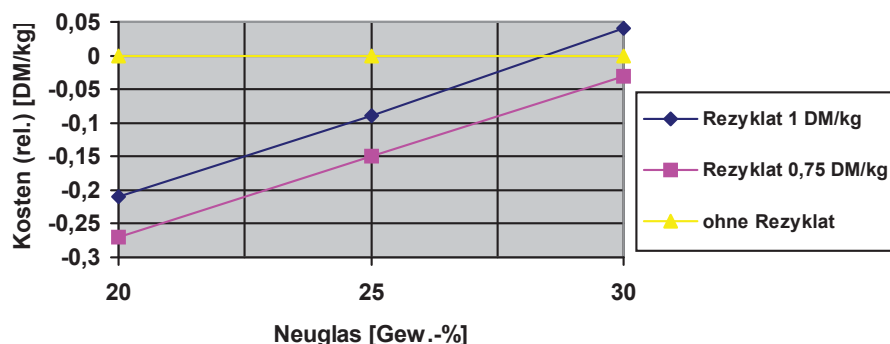
Partikelgrößenverteilung (Durchmesser der feinsten Rezyklate ca. 50 bis 100  $\mu\text{m}$  gegenüber ca. 0,5  $\mu\text{m}$  für den Kreidetyt „Millicarb“ von den Verstärkungsfasern teilweise ausgefiltert werden und vorwiegend in den Außenschichten liegenbleiben. Hierdurch liegt in diesen Bereichen eine erhöhte Rezyklatkonzentration vor, was dazu führt, daß die Verstärkungsfasern von der SMC-Oberfläche zurückgedrängt, und nicht mehr ausreichend von der Matrix benetzt werden. Die Folge ist ein Material mit geringen mechanischen Eigenschaften [10, S. 211]. Positiv macht sich, abhängig von Bauteil und Rezyklatzugabe, im Vergleich zu Neumaterial, eine Gewichtseinsparung bemerkbar [19, S.776].

Recycling-SMC Teile werden erfolgreich in Serie für Verkleidungsteile im Nicht-Sichtbereich und als Recycling-Low-Profile für Sichtteile mit anschließender Lackierung in der Automobilindustrie eingesetzt (vgl. Tab 5.22) [19, S. 777].

**Tabelle 5.22 Anwendungen von SMC-Rezyklaten in Serienbauteilen**

Anwender	Bauteil
Audi	Reserveradmulde
BMW	Schiebedachrahmen
MAN	Abschirmkapsel
Mercedes Benz	Stoßfänger (LKW) Einstieg (LKW) Frontblende (LKW) Kotflügel (LKW)
VW	Frontend (lackiert) Schallschutzkapseln

Abbildung 5.12 zeigt als Beispiel den Bauteilpreis für eine Schallkapsel in Abhängigkeit von Neuglasgehalt, Füllstoffen und Rezyklatpreis [19, S. 779]. Durch die entstehende Dichtereduktion mit zunehmenden Rezyklatanteil steigt zwar der SMC-Halbzeugpreis pro Kilogramm, der für den Bauteilpreis maßgebende Volumenpreis bleibt jedoch gleich.



**Abbildung 5.12 Relative Rohstoffkosten für eine Schallkapsel**

### 5.1.5 Elastomere

Anwendung finden diese Polymere in der Fahrzeugindustrie z.B. als Butadienkautschuk (BR) für Fahrzeugreifen oder als Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPDM) für Kfz-Dichtungsprofile.

Die Altgummientsorgung (Verwertung) in der Fahrzeugtechnik zeigt, mit Ausnahme der Altreifen, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, eine Mengenproblematik auf. Spezielle Recyclingkonzepte für Elastomerwerkstoffe sind nur dann wirtschaftlich, wenn ausreichende Mengen sortenrein anfallen und erfaßbar sind. Kautschukmischungen setzen sich aus einer hohen Anzahl unterschiedlicher Rezepturen zusammen, die nicht standardisiert und jeweils auf spezielle Anwendungsfälle zugeschnitten sind [10, S.231]. Infolgedessen ist auch die Zusammensetzung des anfallenden Altmaterials häufig unbekannt. Daraus ergeben sich für das Rezyklat nur noch Einsatzmöglichkeiten in diversen Gummimatten, Laufbahnen für Sportplätze, Schuhsohlen und als Beimischungen in Straßenbelägen oder Baumaterialien zur Schall- bzw. Wärmeisolierung.

Obwohl ein originärer Einsatz in Fahrzeugen zur Zeit noch nicht erfolgt, wird im Weiteren kurz auf gebräuchliche Verwertungsstrategien eingegangen.

Die weitmaschige Vernetzung der Molekülketten der Elastomere verhindert ein Recycling durch Aufschmelzung. Ihr werkstoffliches Recycling ist deshalb hauptsächlich als Granulat oder Mahlgut sowie als Füllstoff machbar [9, S.34].

Bei den Zerkleinerungsverfahren kann zwischen den Prinzipien Schnitt und Prall sowie zwischen der Kaltzerkleinerung, bei der das Mahlgut tiefgekühlt wird, und der Warmzerkleinerung, die bei Raumtemperatur erfolgt, unterschieden werden. In der Regel werden Altgummiteile zunächst in einem ersten Schritt vorzerkleinert. Dies geschieht im allgemeinen bei Raumtemperatur mit Hilfe von Walzenmühlen oder Schneidmühlen. Die hierbei erzielten Korngrößen liegen im Bereich von 1 bis 6 mm. Eine weitere Materialzerkleinerung erfolgt in einem zweiten Schritt sowohl mit Hilfe von Kalt- (bis 0,05 mm) als auch mit Warmmahlverfahren (bis 50 µm) [10, S. 235].

### 5.1.6 Versuchs/Projektergebnisse

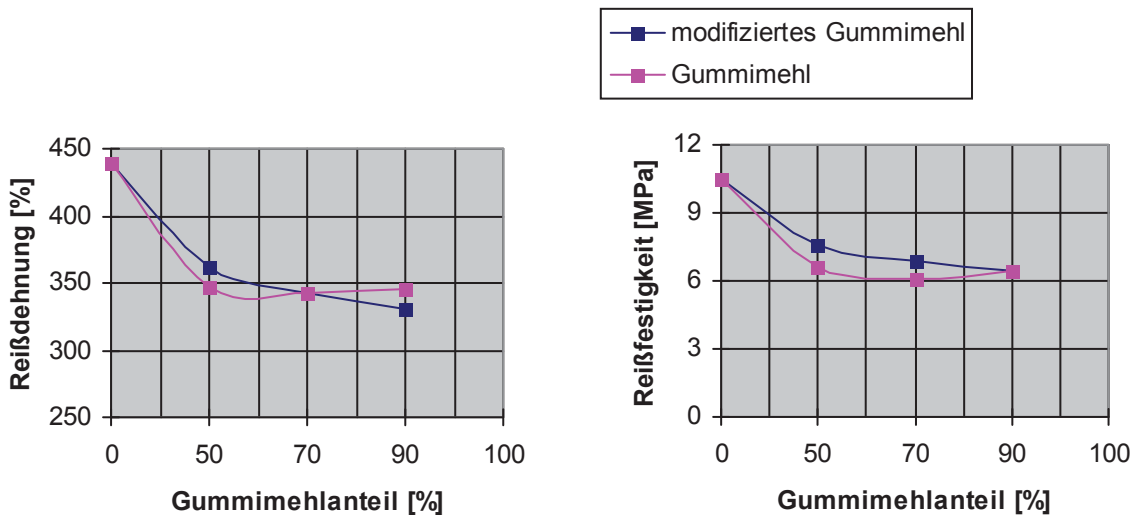
#### 5.1.6.1 Altgummi als Füllstoff:

Eine mögliche Verwendung ist der Einsatz von gemahlenem Altgummi als preiswerter Füllstoff für neue Elastormischungen. Die Neuware bildet hierbei die Matrix, in welche die Altgummipartikel eingelagert werden. Berücksichtigt werden muß jedoch, daß Veränderungen von Werkstoffeigenschaften durch die Zugabe von aufbereitetem Altgummi unvermeidlich sind.

Im allgemeinen führt die Einarbeitung von Altgummiteilen in Elastormischungen zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften. Abbildung 5.13 zeigt dies am Beispiel der Reißfestigkeit und der Reißdehnung für unterschiedliche Altgummianteile [10, S. 239].



Hierbei sind die Ergebnisse bei Verwendung eines unbehandelten Gummimehls und eines kommerziell vertriebenen, oberflächenmodifizierten (zur Verbesserung der Anvernetzung von Altgummipartikel an die Matrix) Gummimehls dargestellt. Beide wurden im Warmmahlverfahren hergestellt.



**Abbildung 5.13 Reißfestigkeit und Reißdehnung (mit und ohne Oberflächenmodifikation)**

Während die Reißdehnung durch die Modifikation nahezu unverändert bleibt, zeigen die Reißfestigkeiten bei 50 und 70 % Gummimehl bezogen auf den Polymeranteil einer Mischung eine erkennbare Verbesserung durch die Modifikation. Als besonders kritisch für diese Materialien gelten jedoch dynamische Beanspruchungen. Hier weisen Mischungen mit Altgummianteilen deutliche Nachteile gegenüber reiner Neuware auf [10, S. 239].

### 5.1.6.2 Formmassen aus Gummigranulat und Bindemittel

Eine andere Möglichkeit ist die Verarbeitung von Gummimehl oder -granulat mit speziellen Bindersystemen. Häufig werden als Binder Polyurethansysteme eingesetzt. Des weiteren gibt es aufschmelzbare Bindersysteme in Granulatform, die zusammen mit dem Gummimehl der Verarbeitungsanlage zugeführt werden und dort aufschmelzen. Auf diese Weise können Werkstoffe mit sehr hohen Anteilen an Altgummi hergestellt werden [10, S. 240].

Bei der Verwendung von Polyurethansystemen wird das Gummigranulat meist mit einer der beiden Ausgangskomponenten des Polyurethans, dem Polyol oder dem Isocyanat (siehe Kap. 5.1.4), vermischt. Die zweite Komponente wird unmittelbar vor der Verarbeitung zugegeben.

Die Zugabe von granulatförmigen, aufschmelzenden Bindemitteln kann über Dosieranlagen zusammen mit dem Altgummi direkt in den Trichter einer Schneckenmaschine erfolgen. Der Binder schmilzt dann entlang der Schnecke auf und wird mit dem Altgummi vermischt.

Ausschlaggebend für die Festigkeitseigenschaften des Materials ist sowohl die Festigkeit des Binders als auch die Adhäsion zwischen Binder und Altgummi. Durch die Korngröße der Gummipartikel und die zugegebene Menge an Binder kann die Porosität des Materials gezielt beeinflusst werden [10, S. 241]. Vor allem für den Einsatz im Außenbereich können so wasserdurchlässige Bauteile oder auch Sportböden hergestellt werden.

## 5.2 Rohstoffliches Recycling

Bei der rohstofflichen Verwertung von Altkunststoffen werden gebrauchte Kunststoffprodukte als Sekundärrohstoffe genutzt. Sie substituieren dabei die fossilen Rohstoffe Kohle, Erdöl und Erdgas.

Die gesammelten Altkunststoffe müssen, ehe sie als Sekundärrohstoffe (analog zu fossilen Rohstoffen) verwendet werden, intensive Vorbehandlungsstufen durchlaufen. Das der rohstofflichen Verwertung zugrundeliegende Gesamtkonzept zeigt Abbildung 5.14. [24, S.103]

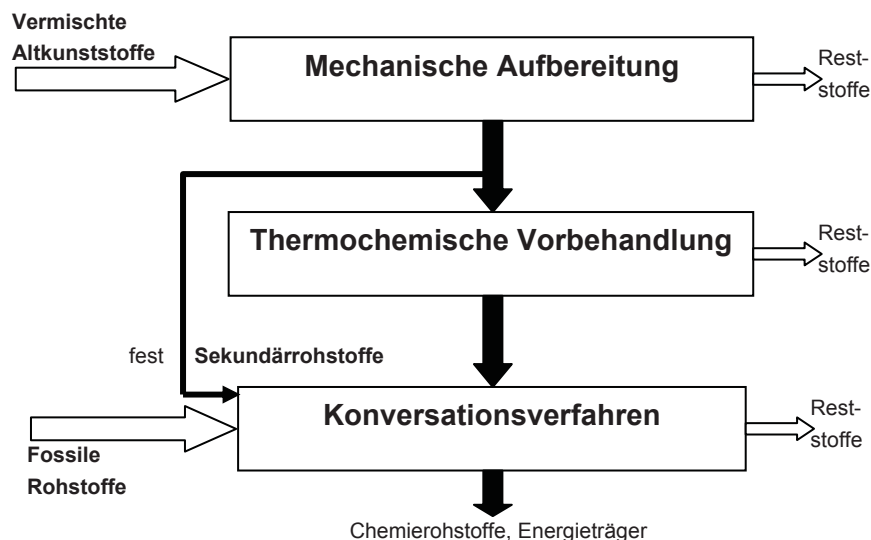


Abbildung 5.14 Konzept der rohstofflichen Verwertung

### 5.2.1 Mechanische Aufbereitung

Erster Behandlungsschritt ist das mechanische Aufbereiten. Auf das Abtrennen von Störstoffen (z.B. Eisenmetalle, anorganisches Inertmaterial) folgen in der Regel zunächst das Vorzerkleinern, dann das Entfernen anhaftender Verschmutzungen in einer Reinigungsstufe. Je nach weiteren Anforderungen können

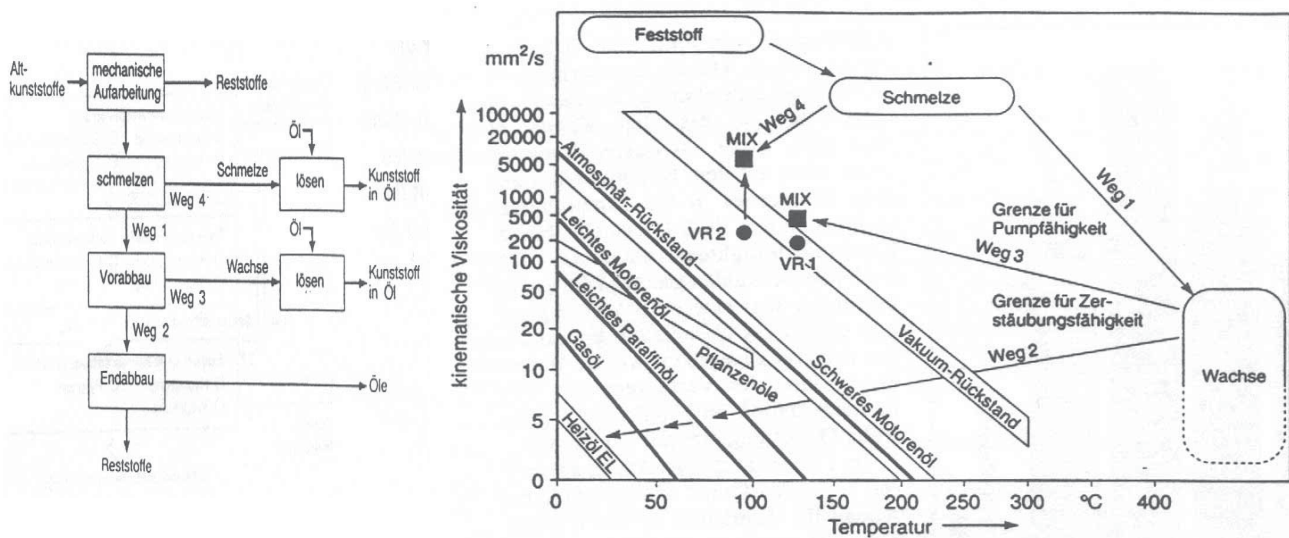
- naßmechanische Dichtentrennung,
- Feinzerkleinerung,
- Agglomeration oder
- Kompaktierung

erforderlich sein. Es resultieren Zwischenprodukte in fester Form.

## 5.2.2 Thermochemische Vorbehandlung

Die Konversionsverfahren auf Erdölbasis erfordern Einsatzstoffe in flüssiger Form. Dazu müssen die mechanisch aufbereiteten Altkunststoffe in der nächsten Stufe eine **thermochemische Vorbehandlung** durchlaufen. Entscheidend dabei ist der thermische (und/oder katalytische) Abbau der Polymerketten und die Abspaltung des Chlors (Dehydrochlorierung). Dabei entstehen niedermolekulare, erdölähnliche Zwischenprodukte in pump oder zerstäubbarer Form (Kunststofföl).

Abbildung 5.15 zeigt die grundsätzlichen Wege zu flüssigen Produkten aus Kunststoffen. Im Viskositäts-Temperatur-Diagramm sind zusätzlich die temperaturabhängigen Viskositäten verschiedener Mineralölprodukte und Rückstände aus der Mineralölaufbereitung sowie die Grenzen der Pump.- und Zerstäubungsfähigkeit eingezeichnet.



**Abbildung 5.15 Wege zu flüssigen Produkten aus Altkunststoffen und ihre Viskositäten**

Durch alle vier Wege lassen sich flüssige Kunststoffprodukte erzielen. Die Verflüssigung über Weg drei und vier erfolgt durch Lösung in Mineralölprodukten. Der Abbau von Kunststoffen zu Ölen (Weg 2) über das Abbauprodukt „Wachs“ hinaus führt stets zur Bildung eines koks.- bzw. teerartigen (schadstoffbelasteten) Rückstandes.

Eine Einteilung der zahlreichen thermochemischen Aufbereitungsverfahren erfolgt grob durch den jeweils verwendeten Reaktortyp:

- Rohrreaktor
- Wirbelschichtreaktor
- Rührkesselreaktor
- Schneckenreaktor

Durch Kombination und Variation der einzelnen Reaktortypen und durch die Wahl der Abbaubedingungen (rein thermisch, thermisch/katalytisch, thermisch/oxidativ,

thermisch/reduktiv) wird jedoch eine genaue Zuordnung sowie eine Abgrenzung zur eigentlichen rohstofflichen Verwertung erschwert. Nachfolgende Verfahren geben einen Überblick über laufende Aktivitäten und sind sicherlich nicht vollständig.

### 5.2.2.1 Visbreaking

Beim Visbreaking handelt es sich um einen Prozeß der Petrochemie, bei dem durch nochmaliges Erhitzen der Destillationsrückstände, z.B. Schwerölrückstände, deren Moleküle in kleinere Bruchstücke zerlegt werden, wodurch nach erneuter Auftrennung durch Destillation die Ausbeute des Rohöles an Benzin und Heizölen steigt. Visbreaking kann für halogenfreie Altkunststoffe benutzt werden, um diese sowohl fließ- als auch pumpfähig zu machen. Bei korrosionsfester Auslegung der Anlagen können auch gemischte Altkunststoffe die Halogene enthalten, depolymerisiert und gleichzeitig dehalogeniert werden [25, S. 114].

Als Eingangsmaterial wird Vakuumrückstand eingesetzt, dem bis zu 10 Gew.-% Kunststoffabfall zugemischt wird [10, S.260].

Gewöhnlich werden *Röhrenöfen* mit anschließender Fraktionierkolonne verwendet. Die Temperaturen liegen im Bereich von 450-480 °C und der Druck im Bereich von 0,9 - 1,8 Mpa [26, S.28]. Nach der Crackreaktion werden die aus dem Ofen austretenden Produkte destillativ aufbereitet.

Die Kohleölanlage Bottrop (KAB) benutzt dieses Verfahren zur Stoffstromvorbereitung für das eigentliche petrochemische Verwertungsverfahren.

### 5.2.2.2 Niedertemperatur-Pyrolyse

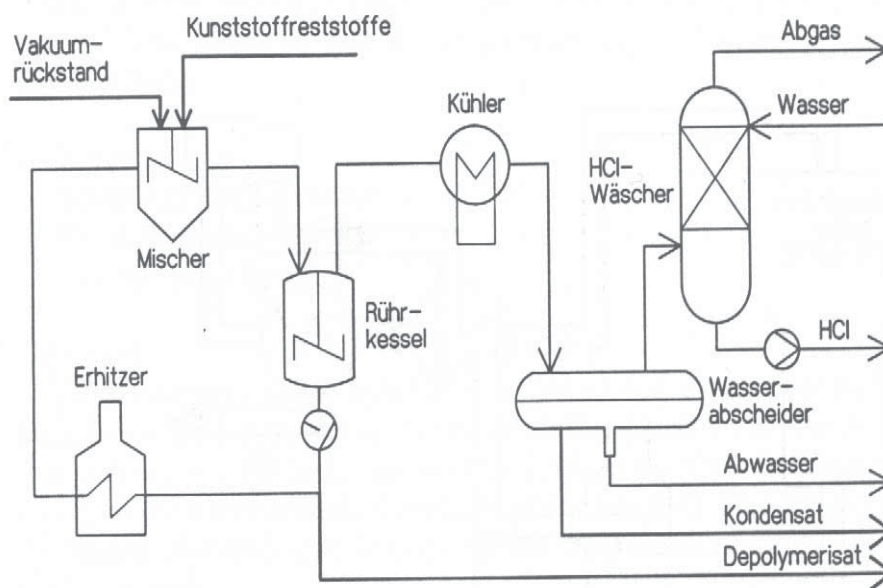
Niedertemperaturverfahren arbeiten in Abhängigkeit von den polymeren Einsatzstoffen bei Temperaturen zw. 200 und 500°C [12, S 148]. Dabei werden vermischte Altkunststoffe rein thermisch in einem *Wirbelbettreaktor* unter weitgehendem Sauerstoffabschluß zu Kohlenwasserstoffen mit Molekulargewichten von 300 bis 500 g/mol abgebaut. Geringe Chlorgehalte von ca. 0,5 Gew.-% sind zulässig und werden durch Reaktion mit Kalziumoxid, das als Pulver mit aufgegeben wird, gebunden. Es entstehen ca. 10% Gase, die zu Heizzwecken im Prozeß verwendet werden, und ca. 90 % petrochemisch verwertbare Öle, die aus linearen und aromatischen Kohlenwasserstoffen bestehen.

Die Entwicklung der Niedertemperatur-Pyrolyse wird zur Zeit von der Firma BP zusammen mit den Firmen DSM, Elf-Atochem, Petrofina und Einichem betrieben. Derzeit ist in Schottland der Bau einer Pilotanlage mit 25000 t/a geplant.

### 5.2.2.3 Thermischer Abbau in Rührkesselreaktoren

Seit Oktober 1993 betreibt Veba-Öl in Verbindung mit der Kohle-Öl-Anlage Bottrop eine Depolymerisationsanlage mit einer Kapazität von 40 000 t/a zum thermischen Abbau von Altkunststoffen.

Bei dem Verfahren (vgl. Abb. 5.16) werden Altkunststoffe zusammen mit Raffinerierückständen in einem Rührkessel bei Temperaturen von ca. 380 bis 400 °C und mehreren Stunden Verweilzeit thermisch abgebaut [24, S. 107].



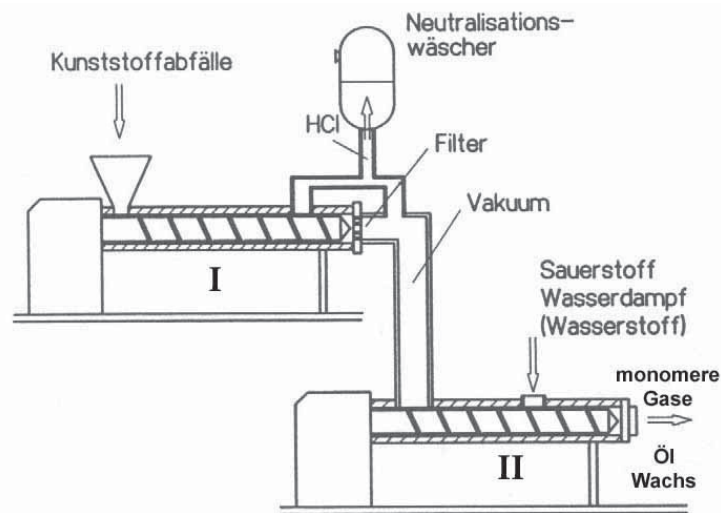
**Abbildung 5.16 Thermische Aufbereitung im Rührkessel (Veba-Öl) [10, S.262]**

Im Kessel findet gleichzeitig eine Dehydrochlorierung der Kunststoffe statt. Die bei der thermischen Behandlung entstehende Gasphase wird abgekühlt, und das ölige Kondensat wird nach einer Öl-Wasser-Trennung gemeinsam mit dem Depolymerisat aus dem Rührkessel in die Sumpfphasenhydrierung des VCC (Veba-Combined-Cracking)-Verfahrens eingesetzt. Die nach dem Abkühlen gasförmigen Anteile werden über eine HCl-Wäsche gereinigt und in das Gasnetz der benachbarten Kokerei abgegeben.

### 5.2.2.4 Thermischer Abbau in Schneckenreaktoren

Der thermische Abbau von gemischten Altkunststoffen kann auch durch herkömmliche Kunststoffextruder durchgeführt werden. Am IKV, Aachen wurde im Hinblick auf die Reduzierung der Viskosität und des Chlorgehalts die degradative Extrusion entwickelt.

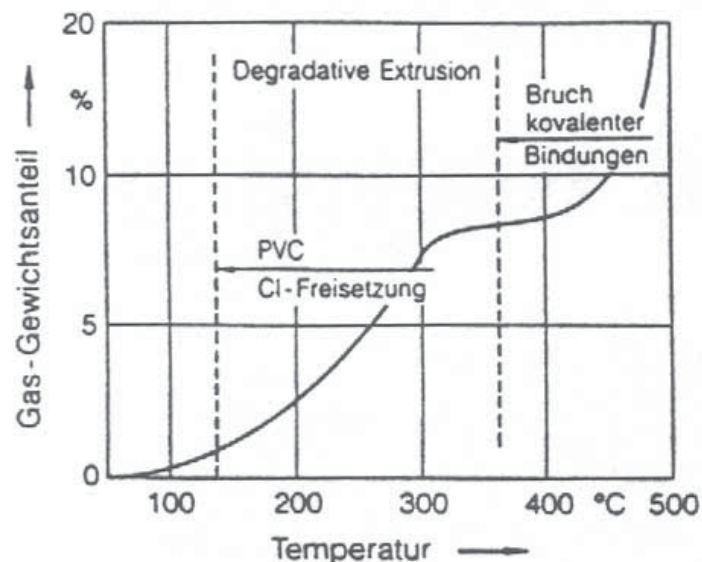
Durch degradative Extrusion (vgl. Abb. 5.17) findet ein molekularer Abbau der vorzugsweise thermoplastischen Kunststoffabfälle in einem Extruder zu niedermolekularen und somit niedrigviskosen Polymerschmelzen statt [10, S. 263].



**Abbildung 5.17 Extruderkaskade zur degradativen Extrusion**

Die mechanisch aufbereiteten Kunststoffabfälle werden in der ersten Extruderstufe auf 300 bis 350 °C aufgeheizt. Hierbei spalten sich die als Substituenten an der Vinylkette hängenden Halogenmoleküle ab und entweichen durch die Entgasungsöffnung. Gleichzeitig werden dadurch aber auch andere flüchtige Anteile wie Wasser und niedrig siedende Hilfsstoffe entfernt. Anschließend werden Füllstoffe ausgesiebt. Die Schmelze wird dann weiter auf ca. 400 °C aufgeheizt, wobei Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Wasser oder den Abbau katalytisch beschleunigende Chemikalien zugesetzt werden können.

Mit steigender Temperatur wächst der Gasanteil (vgl. Abb. 5.18) im ausgetragenen Produkt.



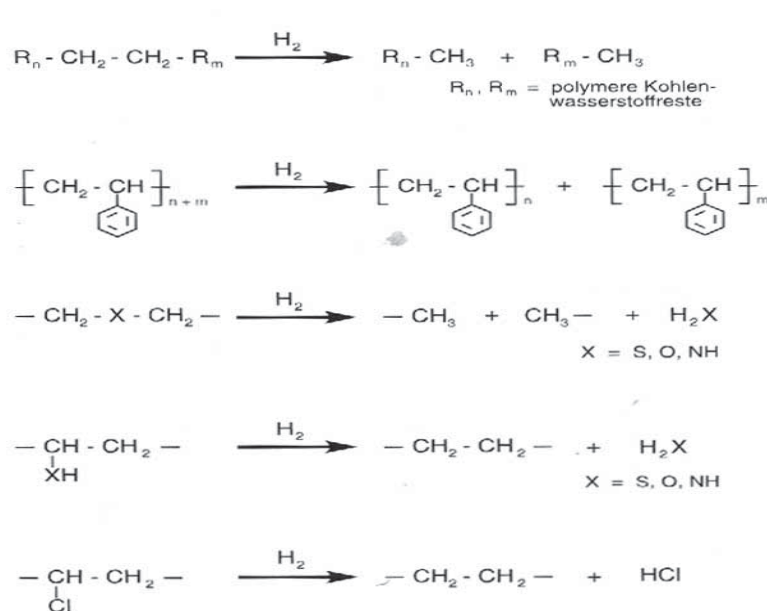
**Abbildung 5.18 Gasgehalt im degradierten Produkt (gemischter Kunststoffabfall mit 10% PVC) [25, S.115]**

### 5.2.3 Chemische Konversionsprozesse

Die zuvor mechanisch und thermisch aufbereiteten Kunststoffe stehen nun als Einsatzmaterial für das eigentliche chemische Recycling zur Verfügung. Die wichtigsten Verfahren werden nachfolgend erklärt.

#### 5.2.3.1 Hydrierung

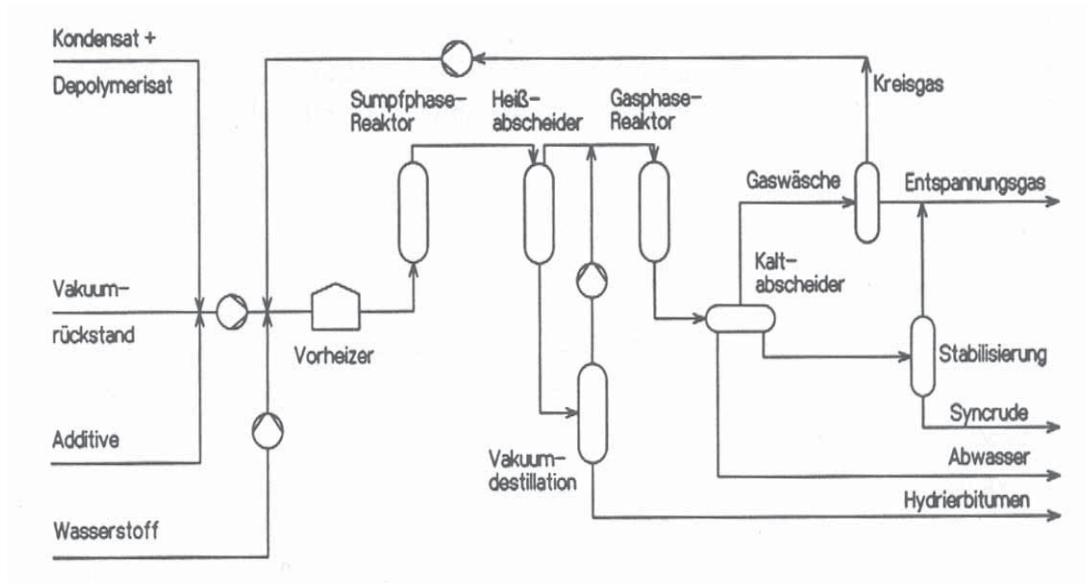
Unter Hydrieren versteht man ganz allgemein die Anlagerung von Wasserstoff an organische Verbindungen. Für das Verfahren sind Temperaturen von 380 bis 500 °C und Wasserstoffdrücke von 200 bis 400 bar erforderlich. Unter diesen Bedingungen werden die Makromoleküle der Kunststoffe thermisch gespalten und die Bruchstücke mit Wasserstoff abgesättigt (vgl. Abb. 5.19).



**Abbildung 5.19 Grundreaktionen bei der Hydrierung von Kunststoffen [26, S. 28]**

Als Produkte der Hydrierung erhält man gasförmige und flüssige aliphatische Kohlenwasserstoffe. Aromatische Verbindungen werden in Cycloaliphate überführt. Die teilweise in Kunststoffen enthaltenen Heteroatome, wie z.B. Stickstoff, Schwefel, Sauerstoff und Chlor, werden während der Hydrierung abgespalten und in ihre Wasserstoffverbindungen übergeführt, die problemlos weiterverarbeitet bzw. entsorgt werden können [16, S. 57]. Anorganische Bestandteile der Kunststoffe verbleiben im Hydrierrückstand.

Eine Großanlage befindet sich in Bottrop bei der Kohle-Öl-Anlage GmbH mit einer Gesamtkapazität von ca. 200 000 t/a (Summe Raffinerierückstand plus  $\leq 30\%$  Kunststoff [27, S. 907]). Geplant ist der Ausbau auf eine Kapazität von 400 000 t/a. Die Umwandlung in ein synthetisches Rohöl (Syncrude) erfolgt in zwei Stufen (vgl. Abb. 5.20).



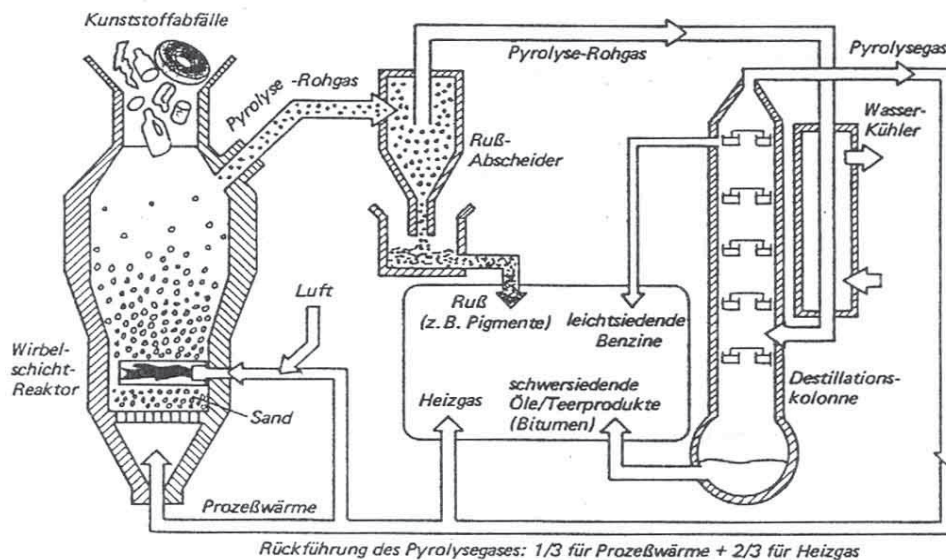
**Abbildung 5.20 Hydrierung von Kunststoffreststoffen bei der Kohle-Öl-Anlage Bottrop**

Bei diesem Verfahren wird das aus der thermischen Aufbereitung der Kunststoffe entstandene Kondensat und Depolymerisat mit Vakuumrückstand, Additiven und Wasserstoff vermischt und nach einer Vorheizung in drei hintereinander geschaltete Sumpfphasenreaktoren geleitet. Dort findet die erste Hydrierung des Gemisches bei Temperaturen von ca. 450 °C und Drücken von 200 bis 400 bar statt [12, S. 156]. Das Produkt wird anschließend im Heißabscheider und in einer Vakuumdestillation aufbereitet. Der Rückstand der Vakuumdestillation ist der sog. Hydrierrückstand, welcher aus mineralischen und schwer hydrierbaren organischen Verbindungen besteht. Die zweite katalytische Hydrierung erfolgt im Gasphasenreaktor. Bei diesem Verfahrensschritt gehen die organisch gebundenen Heteroatome in die entsprechenden Hydroverbindungen ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ) über. Diese Verbindungen werden durch eine nachgeschaltete Wäsche entfernt. Das eigentliche Hydrierprodukt ist das Syncrude (synthetische Rohöl), das in einem Kaltabscheider abgetrennt wird und nach einer Stabilisierung in einer benachbarten Raffinerie wieder eingesetzt werden kann.

### 5.2.3.2 Pyrolyse/Coking

Unter Pyrolyse versteht man die thermische Zersetzung unter Luftausschluss oder zumindest Sauerstoffunterschuss bei gleichzeitiger Produktion von Pyrolyseölen und -gasen, die zur chemischen Nutzung oder Energieerzeugung herangezogen werden können. Den Aufbau einer Wirbelschicht-Pyrolyseanlage zeigt Abbildung 5.21 [33, S. 27].



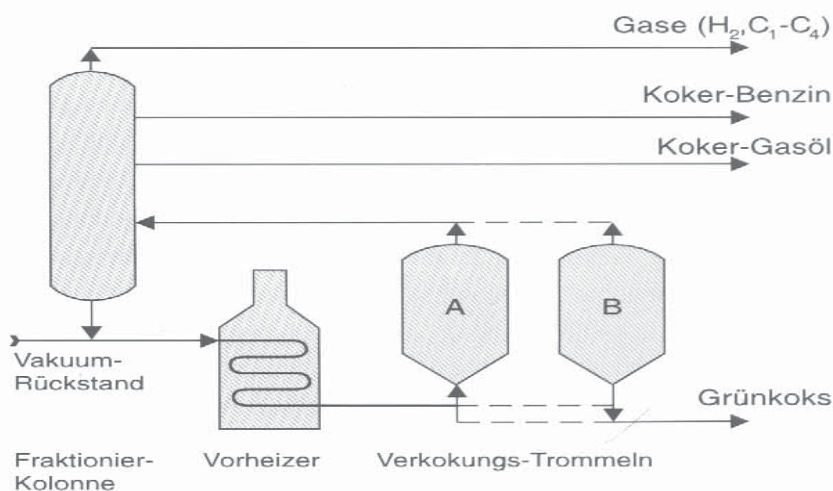


**Abbildung 5.21 Wirbelschicht-Pyrolyse-Recycling von Kunststoffen**

Der Vorteil der Pyrolyse liegt im Vergleich zu einer Verbrennung darin, daß das Volumen der Spaltgase gegenüber dem der Rauchgase von Verbrennungsanlagen um den Faktor 5 bis 20 reduziert werden kann, was zu erheblichen Einsparungen bei der Gasreinigung führt [28, S. 243].

Das Coking ist ein spezielles Pyrolyseverfahren. Das Ziel beim Coking-Prozeß ist die Umwandlung von Erdöldestillationsrückständen in verwertbare Stoffe. Das Coking gilt unter den Spaltverfahren als das unempfindlichste [25, S. 116]. Es läßt sich in Fluid Coking und Delayed Coking unterteilen.

Die Delayed-Coker arbeiten diskontinuierlich bei 480°C und erzeugen bei langen Verweilzeiten hohe Anteile Koks, daneben Gasöl, Benzin und Crackgase. Das Verfahrensprinzip zeigt Abbildung 5.22 [26, S. 27].



**Abbildung 5.22 Schema einer Delayed-Coking Anlage**

Das Einsatzmaterial wird zunächst erhitzt. Die Verkokung findet erst in nachgeschalteten Verkokungskammern statt. Die gasförmigen Spaltprodukte werden über Kopf abgezogen und einer Fraktionierkolonne zugeführt. Derzeit wird untersucht, inwieweit aufbereitete Kunststoffreststoffe diesen Vakuumrückständen zugemischt werden können. Projekte diesbezüglich laufen bei Chevron, dem Chemiekonzern Exxon und in der Esso-Raffinerie Karlsruhe. In Karlsruhe hat der Koker eine Kapazität von 1 Mio. t/a und es sollen dort etwa 50000 t/a Kunststoffreststoffe verwertet werden [10, S. 266]. Problematisch ist, daß der Koker eine Spezifikation von maximal 200 ppm Chlor vorgibt, so daß nur sehr spezielle Kunststofffraktionen hierfür in Frage kommen.

Die Fluid-Coker setzen vorwiegend Vakuumrückstand in einem Wirbelbett aus Kokspartikeln um. Das Verfahren arbeiten kontinuierlich bei 480-560 °C mit geringen Verweilzeiten im Wirbelbett. Neu gebildeter Koks lagert sich auf den Wirbelbetteilchen ab, während die gasförmigen Spaltprodukte über Kopf abgezogen, destilliert und in der Raffinerie wieder eingesetzt werden können. Ein Teil des Kokes wird regelmäßig abgezogen und unter Energiegewinnung in einem benachbarten Ofen abgebrannt. Ein anderer Teil wird zu Petrolkoks weiterverarbeitet. Der restliche Koks geht zurück und bildet das Wirbelbett.

Schwierigkeiten treten bei allen Pyrolyseverfahren auf, wenn Polyvinylchlorid in den Einsatzmaterialien enthalten ist. PVC bildet nämlich bei der thermischen Zersetzung Chlorwasserstoff und chlororganische Verbindungen. Chlorwasserstoff verursacht starke Korrosion an den Anlageteilen, die chlororganischen Verbindungen stören in den Produkten. Abhilfe ist durch Zugabe von Kalk oder Natriumstaub in das Wirbelbett möglich. Dadurch wird das Chlor als Calcium- oder Natriumchlorid gebunden. Nachteil dieser Verfahren ist die Bildung von Anhaftungen und Verklebungen in den Anlagen. Vorzuziehen sind deshalb mechanische oder thermochemische Aufbereitungsverfahren, bei denen das PVC aussortiert oder in einer vorgeschalteten Prozeßstufe dehydrochloriert wird. Technisch läßt sich dies z.B. durch degradative Extrusion auf einem Zweiwellenextruder durchführen (vgl. Kap.5.2.2).

Untersuchungen zu diesem Verfahren laufen zur Zeit in den USA.

### 5.2.3.3 Cracking

Man unterscheidet das Steamcracking und das katalytische Cracking die großtechnische Spaltungsprozesse in der Erdölverarbeitung darstellen. In Westeuropa existieren ca. 50 Anlagen. Für beide Anlagentypen laufen Untersuchungen, diese zur rohstofflichen Verwertung von gemischten Kunststoffen heranzuziehen.

Beim Steamcracking sollen dem normalerweise eingesetzten Naphtha enthalogenierte und abgebaute Kunststoffe (durch Niedertemperatur-Pyrolyse) zugesetzt werden, um daraus Olefine zu erzeugen. Diese sollen dann wieder zum Aufbau neuer Kunststoffe dienen [26, S. 28]. Die Spaltung der Makromoleküle erfolgt dabei durch den Einsatz von Wasserdampf. Nach derzeitigen Untersuchungen scheint der Zusatz von bis zu 20 Gew.-% Altkunststoffen möglich.

Beim Cat oder katalytischen Cracking sollen ebenfalls vorabgebaute Altkunststoffe zugesetzt werden um vorzugsweise Liquid Petroleum Gas und Benzin herzustellen. Nach derzeitigen Untersuchungen scheint auch hier ein Zusatz von bis zu 20 Gew.-% möglich [25, S. 117].

Erste großtechnische Versuche zum Einsatz von Altkunststoffgemischen in einem Steamcracker (unter Produktionsbedingungen) wurden bei der BASF und in den Leuna-Werken erfolgreich abgeschlossen.

#### 5.2.3.4 Vergasung

Da Kunststoffe im wesentlichen aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen, lassen sie sich analog den Erdölrückständen auch vergasen. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Prozessen, bei denen durch die Rückspaltung der Altkunststoffe zu kurzkettigen Kohlenwasserstoffen lagerfähige Öle entstehen, wird bei der Vergasung in Gegenwart von Sauerstoff und Wasserdampf bei 1.350 bis 1.600°C und Drücken bis 150 bar ein sog. Synthesegas, bestehend aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erzeugt, das direkt zur Herstellung von z.B. Ammoniak, Methanol oder Alkohole genutzt wird [26, S.30]. Bei der Vergasung handelt es sich um eine partielle Oxidation, d.h., man arbeitet mit einer zur vollständigen Verbrennung nicht ausreichenden Menge an Sauerstoff.

Man unterscheidet die Herstellung von Synthesegas auf Basis Schweröl und auf Basis Kohlevergasung:

Bei der Vergasung von Schwerölen gibt es das Shell-Verfahren, das Texaco-Verfahren und das Tauchflammen-Verfahren. Das Shell- und das Texaco-Verfahren wird zur Energierückgewinnung vorwiegend ohne direkten Wasserquench betrieben und fordert daher von ihren Einsatzstoffen einen Halogengehalt von < 10 ppm, um Anlagenkorrosion zu vermeiden. Zusätzlich sind Anforderungen an die Viskosität der Einsatzstoffe zu stellen, um optimales Vergasungsverhalten zu gewährleisten. Zudem ist ihr Metall- und Mineralgehalt zu begrenzen, um Abrasion in nachgeschalteten Wärmenutzungssystemen zu unterbinden [29, S. 111].

Eine Verfahrensvariante sieht vor, die durch degradative Extrusion aufbereiteten Kunststoffe in den Reaktor eines Shell-Vergasers einzudüsen (vgl. Abb. 5.23) [25, S. 116].

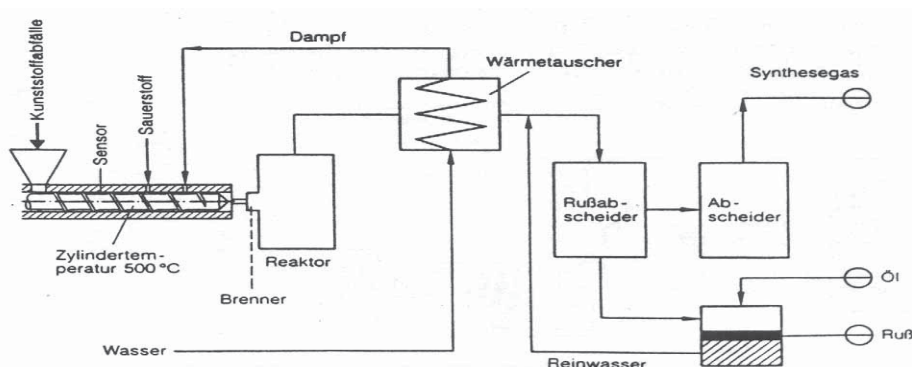


Abbildung 5.23 Synthesegaserzeugung unter Einbindung der degradativen Extrusion

Die bekannten Verfahren der Kohlevergasung werden nach den technischen Ausführungen in Festbett-, Fluidbett- und Flugstromvergasung eingeteilt. Sie stellen im allgemeinen geringere Anforderungen an die Einsatzprodukte als die Schwerölvergasung.

- Festbettdruckvergasung

Die Festbettdruckvergasung mit integrierter Gaskühlung und Wärmeabfuhr ist als klassischer Gegenstrom Schachtreaktor ausgeführt. Der Vergasungsstoff wird als festes, stückiges Produkt in einer Körnung von 0-100 mm in den Reaktor gebracht, in welchem er mit Hilfe von Sauerstoff und Wasserdampf bei Temperaturen von 800-1.300°C vergast wird. Als Einsatzstoffe können zusammen mit Kohle Kunststoffe, Klärschlämme, Altgummi, Lacke, Schredderleichtgut, Altholz und Farbreste eingesetzt werden. Der Vergasungsvorgang ist ein autothermer Prozeß, bei dem der Wärmebedarf durch die ablaufenden Reaktionen gedeckt wird. Der Kohlenstoff des eingesetzten Vergasungsstoffes reagiert mit dem Vergasungsmittel zu brennbaren Gasen. Nicht brennbare mineralische Bestandteile der Einsatzprodukte bleiben in der Schlacke zurück. Im Reaktor selbst herrscht eine reduzierende Atmosphäre [26, S.31].

Das entstehende Rohgas wird schockartig abgekühlt. Damit sind die sogenannten DeNove-Synthesen (Neubildung von Dioxinen, Furanen) ausgeschlossen. Die anfallenden Teeröl-Feststoff-Gemische werden in speziellen Vergasern, im geschlossener Kreislauf, zu Synthesegas umgesetzt. Den Vergasungsanlagen sind Gas- und Prozeßwasserreinigungsanlagen nachgeschaltet. Die Asche wird unten aus dem Reaktor mittels Drehrost ausgetragen.

Der Festbettdruckvergaser der Laubag AG (Schwarze Pumpe) wurde so modifiziert, das bis zu 50 % Kunststoffreststoffe zusammen mit Braunkohlenbriketts zu Synthesegas partiell oxidiert werden kann [10, S 268]. Geplant ist eine Verwertungskapazität in der Größenordnung von 50.000 Tonnen pro Jahr [30, S. 14].

- Wirbelschichtvergasung

Ein bekanntes Wirbelschichtverfahren ist das Winkler-Verfahren. Das Einsatzgut wird in den Winkler-Gasgenerator am unteren Teil eingetragen und dort zunächst in einem Wirbelbett mit Dampf und Sauerstoff vergast.

- Flugstromvergasung

Die Einsatzstoffe Sauerstoff/Kohlenstaub/staubförmige oder flüssige Reststoffe werden über mehrere Brenner in den Reaktor eingeblasen und unter reduzierenden Bedingungen bei Temperaturen zwischen 1300 und 1800 °C abgebaut [26, S. 32]. Als Reststoffe kommen Abfallöle der Festbettvergasung, Altöle, Lösungsmittel, Teerschlämme, Öl-, Farb- und Lackschlämme, Filterstäube sowie feinkörnige Feststoffe (z.B. Altkunststoffe) in Frage.

### 5.2.3.5 Verwertung von Kunststoffen im Hochofenprozeß

Eine Sonderstellung nimmt die Hochtemperaturvergasung von Kunststoffen im Hochofen ein. Dabei wird im Hochofen aus den Eisenerzen durch Reduktion (Sauerstoffentzug) metallisches Eisen erzeugt. Die Reduktion erfolgt mit Hilfe von Synthesegas ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) mit nur geringen Anteilen an oxidierend wirkenden  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . Im klassischen Hochofenprozeß wird das Reduktionsgas durch Vergasen von Koks oder Öl erzeugt. Beim Einsatz von Kunststoffen können diese agglomeriert in den unteren Teil des Hochofens bei Temperaturen über  $2000^\circ\text{C}$  eingebracht und zu  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$  oxidiert werden. Dieses Synthesegas reduziert während des Aufsteigens im Schacht die Eisenerze (vgl. Abb.5.24).

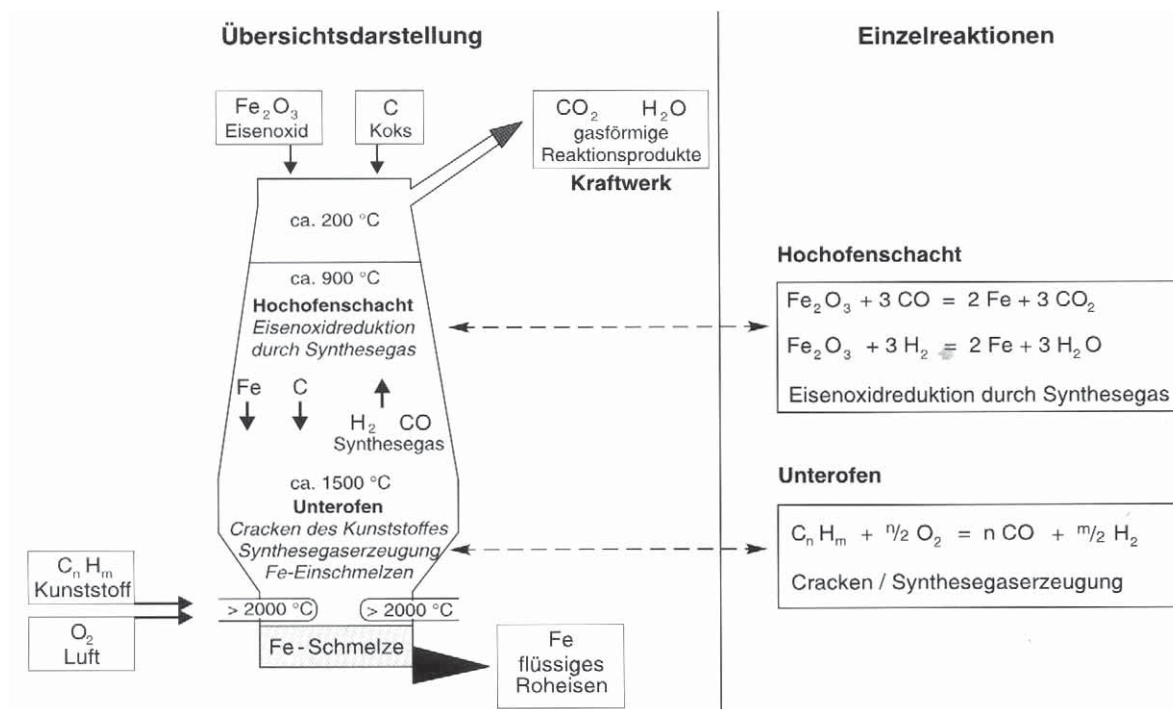


Abbildung 5.24 Chemische Reaktionen im Hochofen

Der Gesamtwirkungsgrad für den Kunststoffeinsatz im Hochofenprozeß liegt bei ca. 80 %. Mehr als 50 % davon entfallen auf die Nutzung der stofflichen Eigenschaften, zur Reduktion des Eisenerzes. Rund 30 % werden im Hochofen zusätzlich thermisch genutzt [32, S. 4].

Obwohl hier kein verwertbares Kohlenwasserstoffprodukt hergestellt wird, kann man dennoch von einem rohstofflichen Recycling sprechen, da hier die Kunststoffe zur Herstellung des Eisens verwendet werden [10, S. 269]. Durch dessen Einsatz können fossile Rohstoffe eingespart werden.

### 5.3 Energetische Nutzung

Eine Verbrennung ist nur dann zu Recyclingverfahren zu zählen wenn eine Energierückgewinnung im Rahmen des Verbrennungsprozesses durchgeführt wird. Trifft dies nicht zu, dann ist die Verbrennung von Kunststoffen zu den Abfallbeseitigungsmaßnahmen zu zählen, ebenso wie die Deponierung [16, S. 61].

Ziel der thermischen Behandlung ist es: [15, S 43]

- Abfälle in verwertbare Rückstände und/oder
- in eine ablagerungsfähige Form zu überführen, letzteres vor allem unter Zerstörung z.T. toxischer organischer Bestandteile und unter Volumenreduzierung
- und die in den Abfällen enthaltene Energie zu nutzen.

Bei der Nutzung von Rohöl wird nur ein sehr geringer Anteil zur Kunststoffproduktion eingesetzt. Der größte Anteil des Rohöls dient direkt der Energiegewinnung (vgl. Abb. 5.25). Dies erscheint unter volkswirtschaftlichen Aspekten unsinnig. Wirtschaftlicher ist es, den Energiegehalt des Rohöls in Form von Kunststoffprodukten zu speichern und ihn erst am Ende eines Produktlebenszyklus durch energetische Verwertung zu nutzen [9, S. 55]. Abbildung 5.26 stellt Heizwerte verschiedener Brennstoffe, Kunststoffe und Abfälle gegenüber.

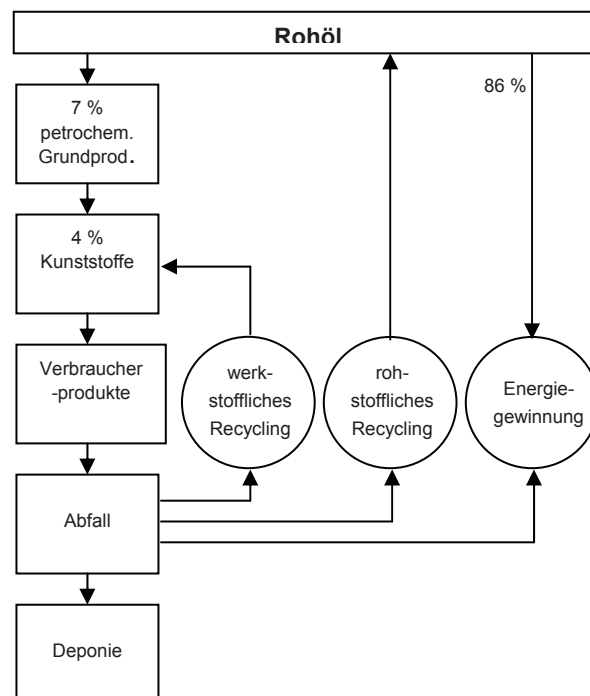


Abbildung 5.25 Durchschnittlicher Rohölverbrauch in Deutschland

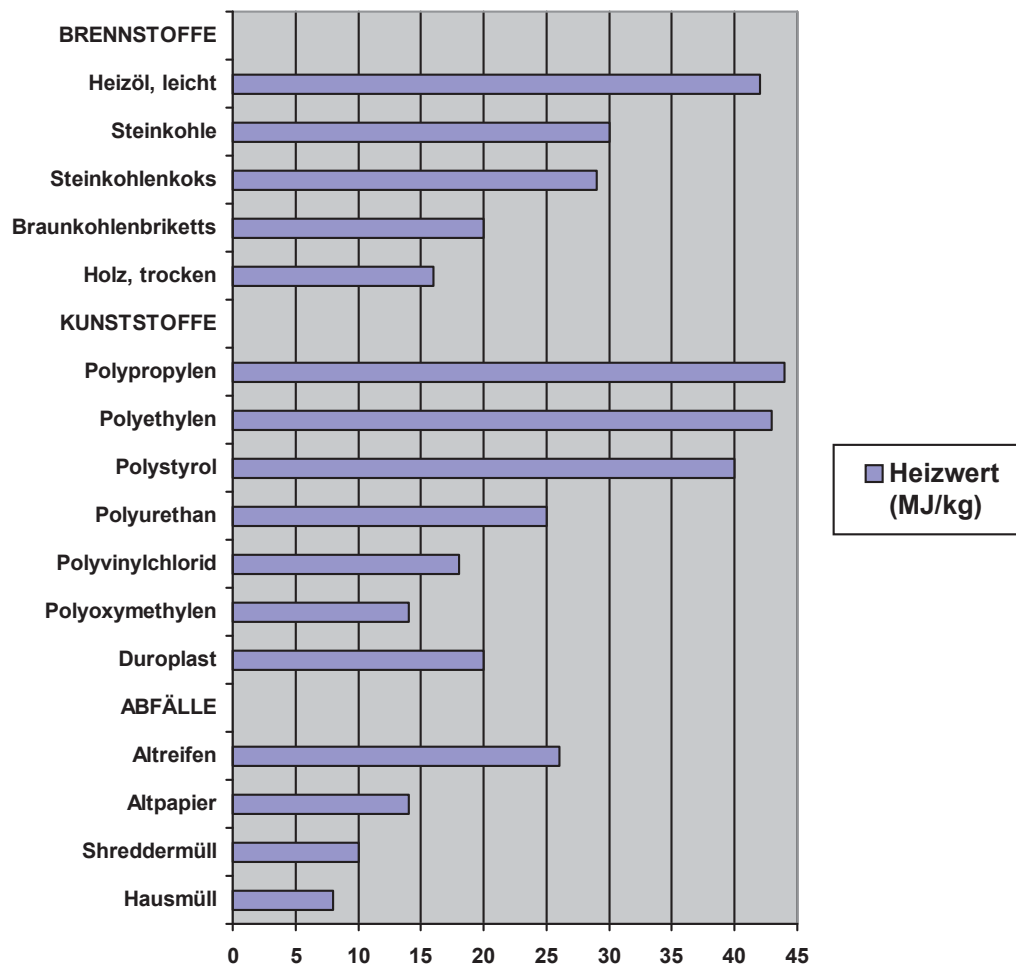


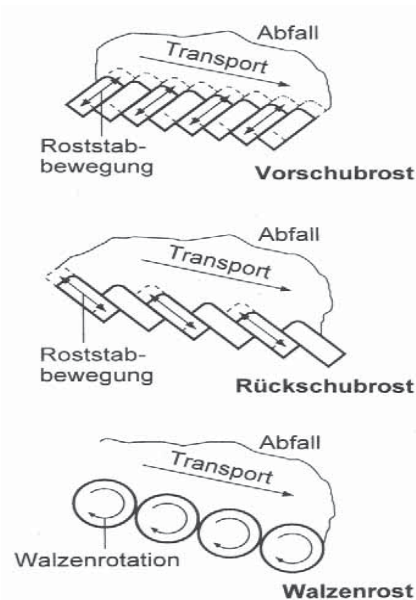
Abbildung 5.26 Heizwerte verschiedener Werk- und Brennstoffe [2, S. 13]

Großtechnische Verfahren für die energetische Verwertung von Kunststoffen:

- Müllverbrennungsanlagen (Rostfeuerung)
- Kraftwerksfeuerungen (Wirbelschicht)
- Zementofen (Drehrohr)
- Verbrennung unter reinem Sauerstoff

### 5.3.1 Müllverbrennungsanlagen

Hausmüll wird in Europa vorwiegend auf Rostfeuerungsanlagen verbrannt. Zu den heute gebräuchlichsten Rostsystemen gehören Walzenroste, Vorschubroste und Rückschubroste (vgl. Abb. 5.27). Diese Systeme haben sich bewährt und bieten auch entsprechende Möglichkeiten zur konstruktiven Gestaltung hinsichtlich optimaler Gasführung, als wichtigsten Faktor für eine emissionsarme Verbrennung [19, S.817].



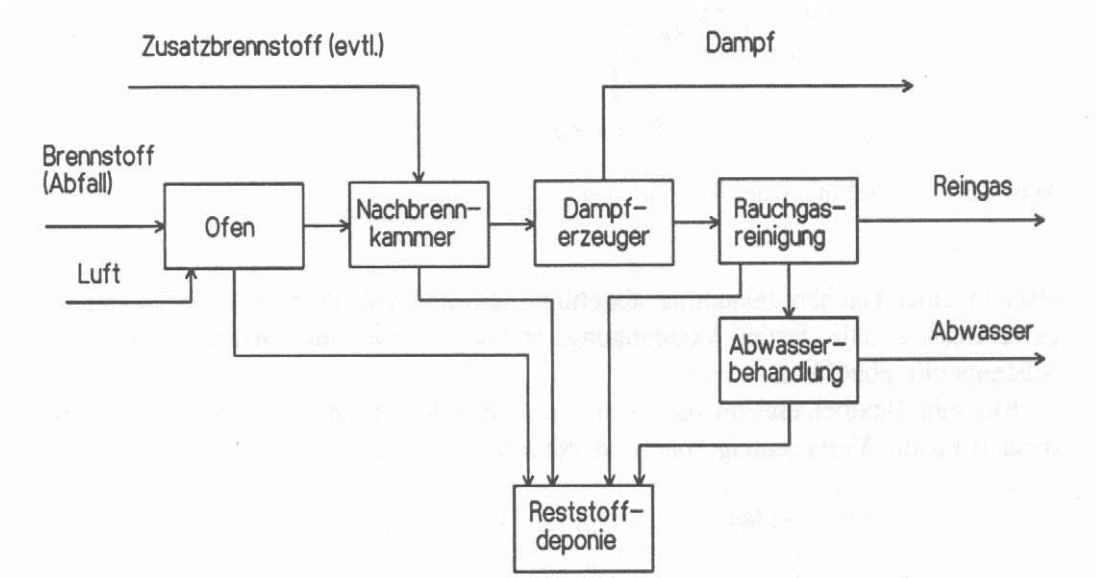
**Abbildung 5.27 Gebräuchliche Rostsysteme**

Der heutige Hausmüll enthält Altkunststoffe von 7 – 15 Gew.-%. Großtechnische Versuche in der Hausmüllverbrennungsanlage Würzburg haben jedoch gezeigt, dass es technisch sehr leicht möglich ist, Hausmüll mit einem doppelt so hohen Kunststoffanteil zu verbrennen [26, S. 40] [30, S. 14]. Der Einfluß der Mitverbrennung auf die Anlage wurde als günstig bezeichnet [31, S. 2].

Die mit einer veränderten Abfallzusammensetzung verbundene Erhöhung des Heizwertes (Hausmüll 8 – 10 MJ/kg; Kunststoff 30 – 40 MJ/kg; vgl. Abbildung 5.26) kann jedoch bei älteren Anlagen zu Problemen führen. Die zulässige thermische Belastung (anlagenspezifisch) könnte überschritten werden. Die einzuhaltenen Temperaturgrenzen sind in sog. Feuerungsleistungsdiagrammen festgelegt [19, S. 818]. Um einer thermischen Überbelastung entgegenzuwirken, müsste die Anlage dann mit einem verminderten Durchsatz betreiben werden.

Abgesehen von den unterschiedlichen Verbrennungskapazitäten, den verschiedenen Verbrennungsrosten, Dampferzeugerbauarten, Rauchgasreinigungssystemen und Reststoffbehandlungs- bzw. Aufbereitungstechniken, gibt es vom grundsätzlichen Verfahrensablauf her gesehen keine großen Unterschiede zwischen den in Betrieb befindlichen Müllverbrennungsanlagen. Der erzeugte Dampf wird zu Heizzwecken oder zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. Die Hauptverfahrensgruppen sind in Abbildung 5.28 dargestellt.





**Abbildung 5.28 Anlagenschema einer Verbrennungsanlage**

Versuche in der Hausmüllverbrennungsanlage Würzburg, die zusammen mit dem Zweckverband Abfallwirtschaft Würzburg, den Anlagenherstellern und der Fachhochschule Würzburg durchgeführt wurden, ergaben folgende Schlußfolgerungen über den Einfluß des Kunststoffes bei der Hausmüllverbrennung [26, S. 40]:

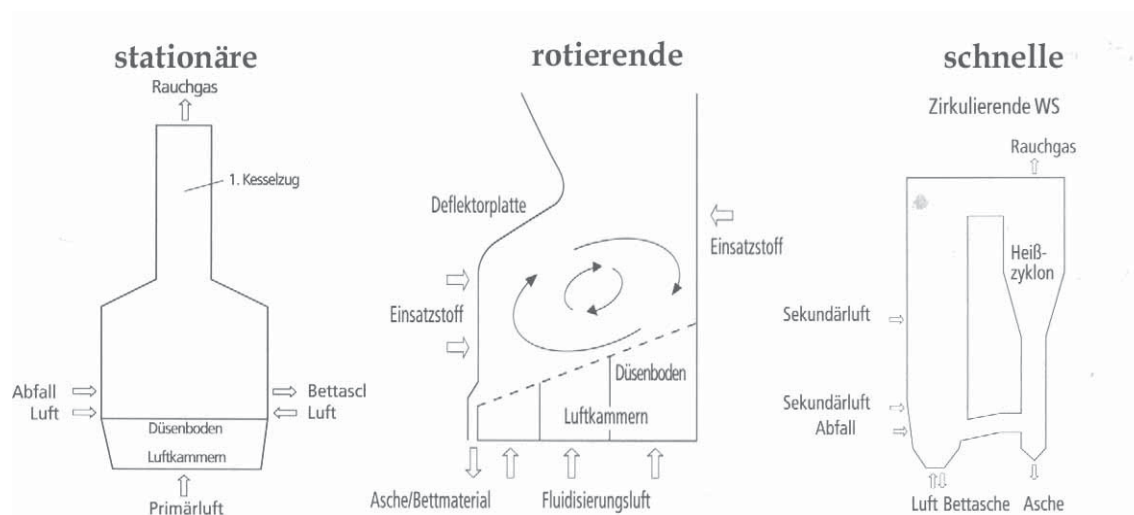
- „Der Kohlenstoffumsatz wird verbessert, d.h., man erhält bessere Ausbrandwerte in der Gas- und Feststoffphase.
- Speziell Cl-haltige Kunststoffe erhöhen die Flüchtigkeit einzelner Metalle und reichen diese in den Flugstäuben an. Metalle werden dadurch aus dem Gutbett und damit aus der Rostasche (Schlacke) entfernt, wodurch eine bessere Verwertung der Schlacke ermöglicht wird.
- Man erzielt stabilere Verbrennungsbedingungen, dies bedeutet geringere CO-Konzentrationen und Verringerung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen.
- Die heutige Hausmüllverbrennungsanlage ist eine Dioxinsenke. Die gemessenen Zerstörungsraten der Dioxine lagen über 80%. Steigende Halogenanteile in der Gesamtfracht erhöhen die Dioxin/Furanwerte nicht. Die sehr detaillierten Untersuchungen zur Bilanzierung der Dioxine und Furane zeigen die sehr positive Rolle der Kunststoffe bei der Hausmüllverbrennungsanlage als Dioxinsenke.“

### 5.3.2 Kraftwerksfeuerungen (Wirbelschicht)

Wirbelschichtanlagen werden neuerdings verstärkt zur Verfeuerung von Abfallbrennstoffen eingesetzt. Für die thermische Nutzung von Klärschlamm, sortiertem oder aufbereitetem Hausmüll, Kunststoffabfällen und diversen Industrieabfällen stellt diese Technologie eine interessante Möglichkeit dar [34] [36, S. 266].

In Abhängigkeit von der Art der Fluidisierung des Wirbelbettes werden unterschieden (vgl. Abb. 5.29):

- stationäre Wirbelschicht
- rotierende Wirbelschicht (Einzel- und Doppelbettvariante)
- schnelle (zirkulierende) Wirbelschicht



**Abbildung 5.29** Aufbau stationäre, rotierende und zirkulierende Wirbelschicht

Wirbelschicht wird bei diesen Verfahren jener Zustand bezeichnet, in dem sich Feststoffpartikel befinden, wenn sie im Reaktor durch das von unten nach oben strömende fluide Medium von ihrem Festbett aufgewirbelt werden [36, S. 254]. Der Übergang vom Festbett zum Wirbelbett, das sich wie ein Fluid verhält, wird als Wirbelpunkt bezeichnet. Das Wirbelbett ist die Grundlage für das Wirbelschichtverfahren. Die Verbrennungstemperatur ( $T < 1000^{\circ}\text{C}$ ) wird durch die Sinterungstemperatur des Sandes im Festbett begrenzt [34, S. 161].

In England wurden Versuche in einer zirkulierenden Wirbelschicht eines Kraftwerkes durchgeführt. Dabei kamen Produktionsabfälle wie Polyamid, Polyester, Polyethylene, Polyurethane sowie PET und PP in Form von Schäumen, Folien und Granulaten zum Einsatz [26, S. 42] [34]. Die Kunststofffraktionen mußten zuerst mechanisch in eine förder- und dosierbare Form gebracht werden. Der maximale Anteil der mitverbrannten Kunststoffe

wurde auf 15 % der thermischen Last beschränkt. Bei dem Versuch zeigten die Emissionen keine Abweichungen vom Normalzustand.

Bei der Verbrennung von Klärschlamm in Wirbelschichtöfen wird dieser zuvor meist auf 30 % Trockensubstanz entwässert, um eine selbstständige Verbrennung ohne Zusatzbrennstoff zu ermöglichen [34, S.162]. Der notwendige Zusatzbrennstoff ist jedoch auch abhängig von der Verbrennungstemperatur, dem Sauerstoffgehalt und der Luftvorwärmer-Temperatur. Anstelle von Gas, Öl oder Kohle kann auch Kunststoff als Zusatzbrennstoff verwendet werden. Hierzu gibt es mehrere Wege:

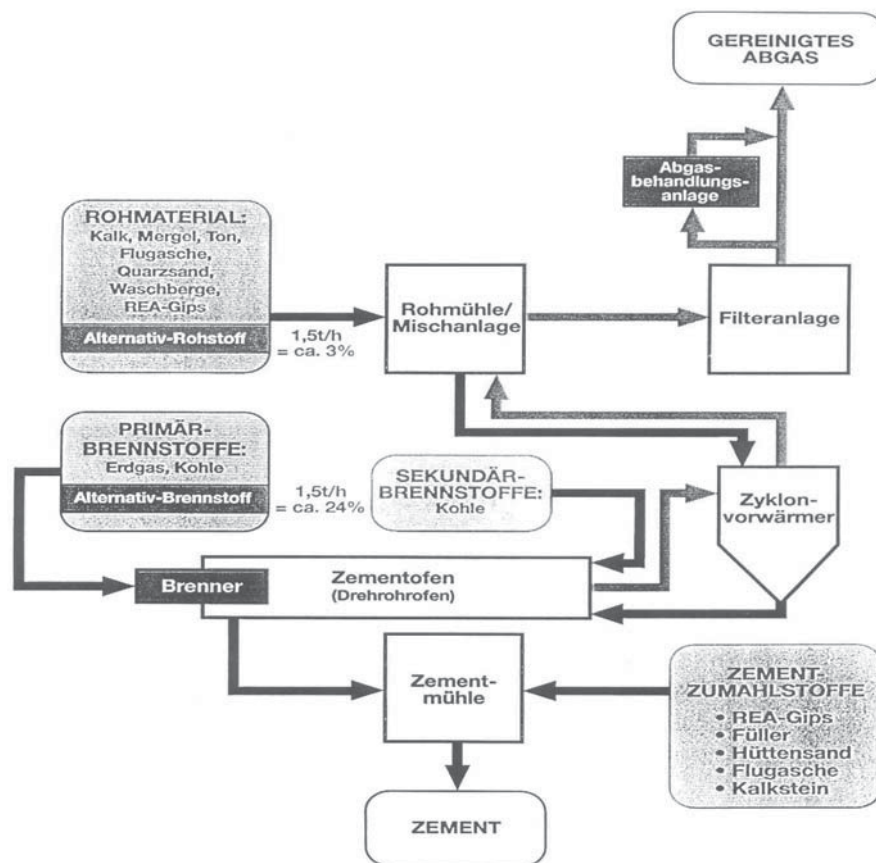
- Zerkleinern auf <1-2 mm, und als Kunststoffsuspension der Filtrierung des Klärschlammes zugeben. Das so zugegebene Kunststoffgranulat kann die Entwässerungsqualität wesentlich steigern. Es kann jedoch je nach Dichteunterschied zu Entmischungen kommen.
- Vermischen des Kunststoffes (Korngröße 8 bis 10 mm) mit dem bereits entwässerten Klärschlamm durch Paddel- oder Schneckenmischer.
- Getrennte Dosierung des Kunststoffes in den Brennraum des Wirbelschichtofens. Dabei werden zerkleinerte Kunststoffteile über Dosiereinrichtungen direkt in den Wirbelofen eingetragen.

Nur durch die ersten zwei Varianten kann der Zusatzbrennstoff dort thermisch umgesetzt werden, wo auch ein Wärmedefizit durch die Wasseranteile im Klärschlamm entstehen.

Zur zweiten Variante wurden von BASF umfangreiche Verbrennungsversuche durchgeführt. Dabei wurden dem Klärschlamm Zusatzbrennstoffe in Form von Kohle und Kunststoff zugemischt. Es konnte nachgewiesen werden, daß durch den Kunststoffeinsatz die CO Emissionen beim Verbrennen im Wirbelbett gesenkt werden können [19, S. 872]. Es ist jedoch zu beachten, daß sich die NO<sub>x</sub>-Bildung gegenläufig zur CO-Entwicklung verhält, wobei hier der wesentliche Faktor die Verbrennungstemperatur ist [19, S. 870] [34, S. 164].

### 5.3.3 Zementöfen

Zement ist ein feingemahltes hydraulisches Bindemittel für Mörtel und Beton, das im wesentlichen aus Verbindungen von Calciumoxid mit Siliciumoxid, Aluminiumoxid und Eisenoxid besteht. Zur Erzeugung von Zement werden die jeweiligen Rohstoffe mechanisch aufbereitet und zu einem Rohmehl vermischt. Dieses Mehl wird dann in Zementöfen (Drehrohr) thermischen Prozessen bei hohen Temperaturen unterworfen. Abbildung 5.30 zeigt eine schematische Darstellung der Zementherstellung [34].



**Abbildung 5.30** Prinzipschema Zementproduktion

Betriebswirtschaftlich ist der Energieverbrauch bei diesem Verfahren von großer Bedeutung. 50 % der Herstellungskosten entfallen auf die Energiekosten, die sich wiederum zu ca. 70 % aus den Brennstoffkosten und zu ca. 30 % aus den Stromkosten zusammensetzen [19, S.847].

In der Vergangenheit hat die Zementindustrie eine große Bandbreite an brennbaren Stoffen als preiswerte Energieträger eingesetzt. Die Palette reicht von Altölen bis zu Altreifen. Hoher Wirkungsgrad und hohe Einbindekraft von Schwermetallen in den Klinker neben großen Kapazitäten lassen einen Einsatz von Altkunststoffen interessant erscheinen. Einer hohen Verweilzeit von mindestens 3 Sek. bei Brennguttemperaturen von über 1.200 °C sowie die stark basische Zusammensetzung des Brenngutes sind optimale Voraussetzungen für eine umweltgerechte Verwertung von schadstoffbelasteten Brennstoffen [26, S. 42] [39]. Schwermetalle, die mit den Roh- und Brennstoffen in das Ofensystem gelangen, werden in den Klinker eingebunden. Emissionsmessungen zeigen, daß die vorgegebenen Grenzwerte mit Sicherheitsabstand eingehalten werden können [19, S. 854].

Untersuchungen der EniChem Ravenna, Italien, zum Einsatz von Altkunststoffen haben gezeigt, daß sich diese Abfälle im Zementprozeß verwenden lassen. Ähnliche Versuche sind in der Schweiz durchgeführt worden [39]. Im Zementwerk Rüdersdorf wurde mit einem

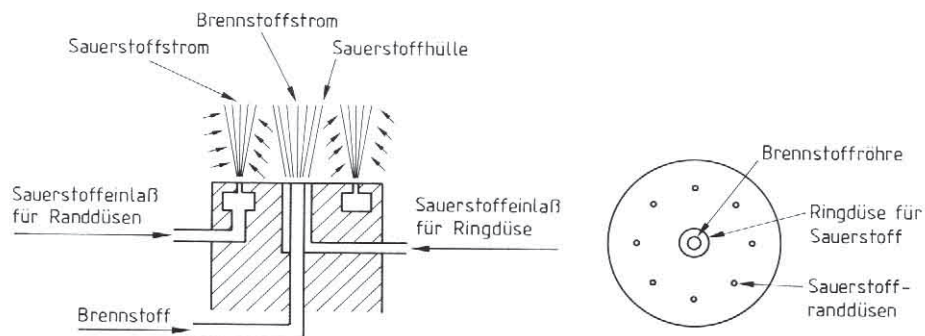
Investitionsaufwand von mehr als DM 500 Mio. eine Anlage nach dem modernsten Stand der Technik gebaut.

1994 wurden 120.000 Tonnen Sekundärbrennstoffe (Papier, Textilien und Altkunststoffe) für ein Zementwerk in Norddeutschland aufbereitet und energetisch verwertet. Diese Sekundärbrennstoffe ersetzen 40 % des Primärbrennstoffes [26, S. 43].

### 5.3.4 Verbrennung unter reinem Sauerstoff

Es wurde schon oft versucht bestehende Verbrennungsanlagen mit Sauerstoff angereicherter Luft zu betreiben. 30 % Anreicherung war etwa die Grenze, bis zu der man noch keinerlei Umbauten an der Anlage gegenüber Verbrennung unter Luft vornehmen mußte. Die damit erzielten Erfolge und Vorteile wurden jedoch als schlecht bewertet [19, S.890].

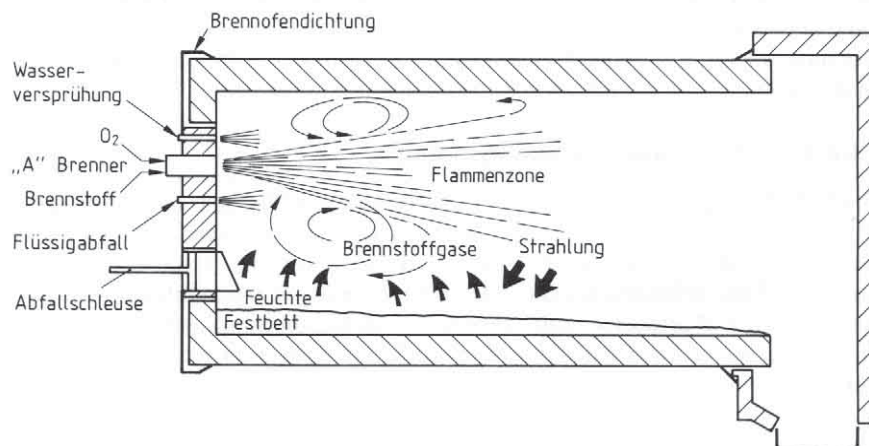
Ein relativ neues Verfahren arbeitet mit reinem Sauerstoff. Die Vermischung eines flüssigen Brennstoffes mit dem Sauerstoff erfolgt hierbei erst nach dem Austritt aus dem Brenner im Ofenraum (Drehrohrofen). Der Brenner (vgl. Abb. 5.31) wird beim Anfahren mit Öl betrieben, welches aus degradierten Kunststoffabfällen bestehen kann (vgl. Kap. 5.2.2).



**Abbildung 5.31 Sauerstoffbrenner**

Das Heizöl wird mit Druckluft oder Dampf aus der eigenen Wärmeerzeugung zerstäubt. Der Brenner und der Ofen müssen wegen der hohen Temperaturen (1500 bis 1600 °C) wassergekühlt sein. Die notwendige Kühlung des Ofens kann dadurch erreicht werden, indem man gleichzeitig mit dem Sauerstoff Wasser eingedüst oder indem man durch Zugabe von heizwertarmen Produkten (z.B. Klärschlamm) die Ofentemperatur niedrig hält [19, S. 891].

Kunststoffabfälle müssen dem Drehrohrofen gleichmäßig aufgegeben werden, damit die Verbrennung gleichmäßig und verpuffungsfrei abläuft. Weiters ist dadurch keine aufwendige Regelung der Sauerstoffzufuhr notwendig. Die zu verbrennenden Altkunststoffe werden daher grob auf Handtellergröße zerkleinert und mit einer Schüttelrutsche oder besser mit einer Schnecke dem Ofen zugeführt (vgl. Abb. 5.32).



**Abbildung 5.32 Strömungen im Drehrohrofen**

Eine Nachbrennkammer ist durch den langen Ofen, in dem im Gleichstrom verbrannt wird, nicht notwendig. Häufig wird mit einer Rauchgasrückführung gearbeitet, die in erster Linie zur Kühlung genutzt wird, jedoch auch für einen gleichmäßigen Ausbrand sorgt, was jedoch in Anbetracht der hohen Reaktivität des Sauerstoffs kaum erforderlich ist [19, S.892]. Die anfallende Schlacke läuft am Ende des Ofens zum Abschrecken in ein Wasserbecken und kann als Baumaterial verwendet werden.

Insbesondere aus den USA wird von immensen Energieeinsparungen bei der Verbrennung von Sondermüll berichtet, wobei diese Ergebnisse deswegen so interessant sind, weil sie auf einer über Jahre gesammelten Erfahrung mit sehr großen, durchgesetzten Mengen basieren [19, S.893].

Ein weiteres Beispiel zu dieser Technik ist eine Anlage im Metallhüttenwerk Schumacher in Rommerskirchen zum Einschmelzen von Blei aus alten Starterbatterien. Hier werden die geshredderten Gehäuse alter Starterbatterien aus PP und PVC als Brennstoff genützt, um die nötige Wärme zum Einschmelzen des Altbleis zu liefern. Trotz den zusätzlichen Kosten durch den Flüssigsauerstoff erweist sich die Anlage wirtschaftlicher als eine konventionelle Schmelzanlage. Dies alleine schon deswegen, weil der Ofendurchsatz dank des nicht vorhandenen Ballast-Volumens an Stickstoff ca. zweimal so groß ist [35, S. 61] (Luftzusammensetzung: ~78 Vol.-% N<sub>2</sub>, ~21 Vol.-% O<sub>2</sub>, Argon, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Edelgase). Der Kunststoff verbrennt völlig rußfrei und nach Reinigung der Abgase in einem Hochleistungs-Gewebefilter werden alle zulässigen Abgaswerte eingehalten.

Bei dieser Betriebsweise gelingt es, 30 bis 50% des Brennstoffes gegenüber Verbrennung mit Luft einzusparen. Durch die hohe Temperatur werden alle organischen Verbindungen

zerstört, weshalb auch Sonderabfälle mitverbrannt werden können. Neben dem besseren Dampfkesselwirkungsgrad kommt es zu einer Verminderung der Rauchgasmenge auf ca.  $\frac{1}{4}$ , da der Stickstoffanteil der Verbrennungsluft von 78 %, der bei der normalen Verbrennung als Ballast wirkt, fehlt [19, S. 894].



## 6 Zusammenfassung / Ausblick

Schon lange sind die Metallkreisläufe in der Fahrzeugindustrie geschlossen. Die Herausforderung, auch die restlichen Materialien, insbesondere die Kunststoffe, aus den Fahrzeugen in geschlossene Materialkreisläufe einzuleiten, wird durch die einheitliche europäische Altautorichtlinie („End-of-Life Vehicles Directive) zur Notwendigkeit. Geforderte Verwertungsquoten bis 1.1.2015 von mindestens 95% lassen sich in der Fahrzeugindustrie nur durch den Ausbau sowohl rohstofflicher, werkstofflicher als auch energetischer Verwertungsverfahren für Kunststoffe erfüllen.

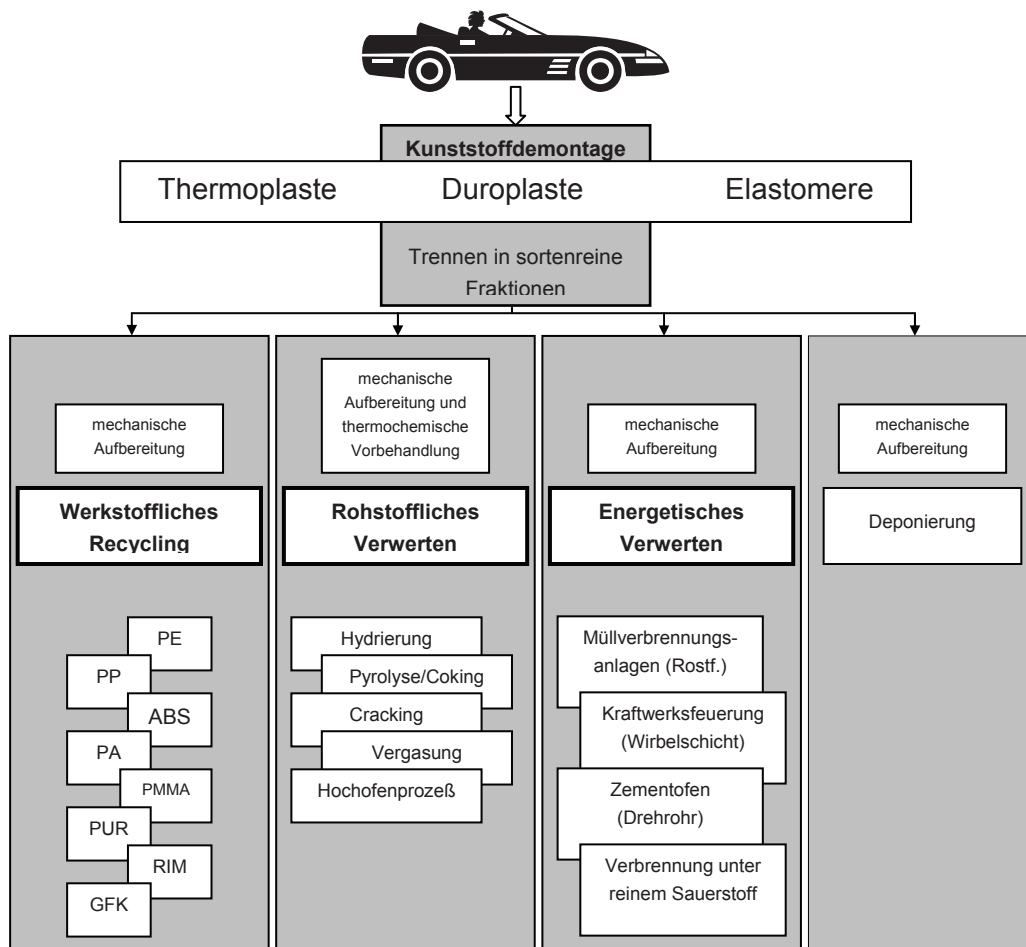
Beim werkstofflichen Recycling bieten sich primär großvolumige, leicht zu demontierende Bauteile an. Das Erkennen und Erfassen von sortenreinen Fraktionen kann durch eine noch genauere und einheitliche Kennzeichnung der Kunststoffteile sowie durch den Einsatz von Demontagehandbüchern und IR-Detektoren erleichtert werden. Recyclingversuche wurden vorwiegend mit sortenreinen Altkunststofffraktionen durchgeführt. Abhängig vom eingesetzten Kunststoff ergaben sich teilweise sehr gute Rezyklateigenschaften. Oft sind jedoch die optischen Eigenschaften von Kunststoffbauteilen, die aus Recyklaten oder mit einem Recykatanteil gefertigt wurden, beeinträchtigt und können somit nur noch im nicht sichtbaren Bereich eingesetzt werden.

Mit der rohstofflichen Verwertung besteht die Möglichkeit, große Mengen auch an gemischten Kunststoffen wieder in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Entsprechend aufgearbeitet können sie im Produktionsbetrieb als Ersatz für natürlich vorkommende Rohstoffe, als sogenannte Sekundärrohstoffe, eingesetzt werden. Es ist jedoch zu beachten, daß vor allem rohstoffliche Verfahren mit einem hohen Energieaufwand verbunden sind.

Der Heizwert der Kunststoffe ist mit dem von Erdöl vergleichbar und größer als bei Kohle. Seine Nutzung als Prozeßenergie und zur Energieversorgung führt zur Einsparung anderer Primärenergie (Heizöl, Erdgas, Kohle). Die Möglichkeit, daß man bei der energetischen Nutzung einen Großteil der im Kunststoff enthaltenen Energie nutzen kann, erscheint sehr positiv. Dies vor allem dann, wenn sich andere Verwertungsverfahren als nicht wirtschaftlich erweisen.



In der folgenden Abbildung sind alle in dieser Arbeit betrachteten Verwertungsverfahren, die den Stand der Technik entsprechen, dargestellt. Auf die Möglichkeit der Deponierung wurde jedoch nicht näher eingegangen.



Für das Kunststoffrecycling stehen drei Verfahren zur Verfügung. Nun muß die jeweils ökologisch und ökonomisch sinnvollste Variante gewählt werden. Es ist absehbar, daß nur ein Mix aus allen drei Verwertungsverfahren zum Ziel der Verwertungsquote von 95 % führen wird.

Um in Zukunft ein qualitativ noch hochwertigeres Kunststoffrecycling zu ermöglichen, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- So wenig wie möglich verschiedene Werkstoffe verwenden, solange die funktionellen Anforderungen erfüllt werden können.
- Die Materialvielfalt und der Einsatz von Mehrstoffverbindungen erschweren eine Demontage und die sortenreine Trennung. Demnach sollen Werkstoffe nur dann kombinieren werden, wenn eine Trennung leicht möglich ist.
- Einfach lösbare Verbindungstechniken von Bauteilen zu Bauteilgruppen wählen.

- Erarbeitung von rationalen Demontage- und Sortiertechniken.
- Mehrstoffverbindungen oder Baugruppen sollen aus Materialien bestehen, die sich untereinander „vertragen“ (z.B. Bauteilgruppen werden eingeschmolzen und ergeben einen neuen Werkstoff).
- Bei der Konstruktion sollen Materialien gewählt werden, für die es bereits geeignete Recyclingtechnologien gibt.
- Wenn es möglich ist sollen nicht nur rezyklierbare Kunststoffe, sondern auch Kunststoffe mit einem hohen Rezyklatanteil beim Ersteinsatz Verwendung finden.
- Verwendete Kunststoffe sind gemäß ISO oder DIN-Norm zu kennzeichnen.
- Die Oberflächenbehandlungen und Lackierungen von Kunststoffen sind auf ein Minimum zu reduzieren.
- Der Aufbau eines geeigneten Demontage- und Sammelsystems ist notwendig um einen kontinuierlichen Materialfluß zu ermöglichen.

Beim Einsatz von Kunststoffen dürfen zukünftig nicht nur die angestrebten Fertigungs- und Gebrauchseigenschaften im Mittelpunkt stehen. Werkstoffauswahl und Bauteilgestaltung müssen unter dem Gesichtspunkt der Recyclingfähigkeit verbunden mit einer ökologischen Beurteilung betrachtet werden. Diese Informationen müssen den KonstrukteurInnen von Fahrzeugen zur Verfügung stehen. Nur dadurch können Fahrzeuge hergestellt werden, die eine Wiederverwendung/Verwertung von 95 Gew.-% nach Beendung der Nutzungsphase ermöglichen.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literatur

- [1] Polz P., Altauto-Recycling (Sonderheft der Zeitschrift SEKUNDÄR-ROHSTOFFE), Gauting, Peter Polz Verlag, August 1994
- [2] Gruden D., Umweltschutz in der Automobilindustrie (Vorlesungsunterlagen), Wien, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge der TU-Wien, 1997
- [3] Wirtschaftskammer Österreich (Hrsg.), Umweltverträgliches Alt-PKW-Recycling, Berichtsjahr 1999
- [4] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Kunststoffe im Automobilbau: Tagung Mannheim 5. und 6. April 2000 / VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2000
- [5] Schörghuber W., Abfallwirtschaftsgesetz: Überblick und Gesetzestexte, Salzburg, Wirtschaftskammer Salzburg, 1999
- [6] Wirtschaftskammer Österreich (Hrsg.), Alt-PKW-Recyclingvereinbarung in Österreich, Berichtsjahr 1998
- [7] Giesberts/Hilf, Kreislaufwirtschaft Altauto: Altautoverordnung und Freiwillige Selbstverpflichtung – Rechtsfragen und praktische Umsetzung, Berlin, Erich Schmidt Verlag, 1998
- [8] Härdtle/Marek, MÜLL und ABFALL - Fachzeitschrift für Behandlung und Beseitigung von Abfällen, Berlin, Erich Schmidt Verlag, 1994
- [9] Kahmeyer M., Recyclinggerechte Produktgestaltung, Würzburg, Vogel Verlag, 1996
- [10] Wolters L., Kunststoff-Recycling – Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele, München, Carl Hanser Verlag, 1997
- [11] Deutsche Industrie für Normung (Hrsg.), DIN 7728/7728/1629, Berlin, Beuth Verlag, 1988
- [12] Jungbauer A., Recycling von Kunststoffen, Würzburg, Vogel Verlag, 1994
- [13] Hornbogen R., Recycling – Materialwissenschaftliche Aspekte, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1993

- [14] Christill M., Kunststoff im Automobil – Einsatz und Verwertung, Frankfurt, Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V., April 1999
- [15] Schmidt J., AUTOMOBIL-RECYCLING, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1995
- [16] Ackermann, Recycling von Kunststoffen – eine ökonomische und ökologische Betrachtung des Recyclings von Kunststoffabfällen aus langlebigen Gebrauchsgütern der Branchen Automobil- und Elektroindustrie, Berlin, Erich Schmidt Verlag, 1996
- [17] Hooch/Schult, Abschlußbericht PRAVDA 2 (Projektgruppe Altautoverwertung der deutschen Automobilindustrie) – Werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen aus Altfahrzeugen, Frankfurt, Verband der Automobilindustrie, 1998
- [18] Christill M., Verwertung von Polyethylen-Kunststoffkraftstoffbehältern aus Altfahrzeugen – Vortrag auf der International Conference on Car Recycling and Recovery in Brüssel, Ludwigshafen, BASF, 1997
- [19] Bittner/Michaeli/Menges, Die Wiederverwertung von Kunststoffen, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1995
- [20] Becker/Braun/Woebcken, Kunststoffhandbuch 10 (Duroplaste), München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1998
- [21] Schröter/Lautenschläger/Bibrack, Taschenbuch der Chemie, Leipzig, Fachbuchverlag GmbH, 1991
- [22] Forster/Lederer, Kunststoffe, Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag, 1987
- [23] Petersen/Kleba, PURer Leichtbau – Leichtbaukonzepte mit Polyurethanen im Automobilbau, in KU Kunststoffe, München, Karl Hanser Verlag, 2000
- [24] Menges G., Rohstoffliche Verwertung – die Aufbereitung, in KU Kunststoffe, München, Karl Hanser Verlag, 1994
- [25] Menges G., Entwicklungen beim chemischen Recycling, in KU Kunststoffe, München, Karl Hanser Verlag, 1994
- [26] Verband Kunststoffherzeugende Industrie (Hrsg.), Kunststoff kann man wiederverwerten –werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertungswege, Frankfurt/Main, Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V., 1998

- [27] Vesper D., Rohstoffliche Verwertung – eine Übersicht, in KU Kunststoffe, München, Karl Hanser Verlag, 1993
- [28] Menges G., Recycling von Kunststoffen, Wien, Karl Hanser Verlag, 1992
- [29] Wanjek/Stabel, Rohstoffrecycling – die Verfahrenstechnik, in KU Kunststoffe, München, Karl Hanser Verlag, 1994
- [30] Christill M., Kunststoff im Automobil – Einsatz und Verwertung, Frankfurt am Main, Verband Kunststoffherzeugende Industrie e.V., 1999
- [31] Association Of Plastics Manufacturers In Europe, Energetische Verwertung von Automobilshredder-Restabfall (RESH) im MHKW Würzburg, in Bericht Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg, 1997
- [32] Rob P., Eisengewinnung mit Altkunststoffen, in Informationsheft Duales System Deutschland, Köln, Duales System Deutschland, 1995
- [33] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte – VDI-Handbuch Konstruktion 2243, Berlin, Beuth Verlag, 1991
- [34] Ragoßnig/Nelles/Tesch/Lorber, Thermische Verwertung von Abfällen in Wirbelschichtanlagen der österreichischen Industrie, in Tagungsband zur VDI-GET Fachtagung „Wirbelschichtfeuerung und Vergasung – Erfahrungen und Perspektiven“, Leoben, Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, 2000
- [35] Du Pont de Nemours (Hrsg.), Kunststoffrecycling – eine Herausforderung für uns alle, Bad Homburg, Du Pont de Nemours (Deutschland), 1990
- [36] Thome-Kozmiensky, Thermische Abfallbehandlung, Berlin, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1994
- [37] Rat der Europäische Union (Hrsg.), Vorschlag für eine Richtlinie des Rates über Altfahrzeuge (Dokument 597PC0358), in: Homepage der Europäischen Union, [http://europa.eu.int/eur-lex/de/search\\_com\\_simple.html](http://europa.eu.int/eur-lex/de/search_com_simple.html), Brüssel, Europäische Union, 2000
- [38] Mortimer E., Chemie – das Basiswissen der Chemie, Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1987
- [39] Ragoßnig/Nelles/Tesch/Lorber, Mitverbrennen heizwertreicher Abfallfraktionen in industriellen Feuerungsanlagen – derzeitiger Stand in Österreich, in IED Schriftenreihe Abfall - Umwelt, Cottbus, 1999

## 7.2 Verwendete Abkürzungen/Begriffe

a	Jahr
Abb.	Abbildung
ACCORD	Automotive Consortium on Recycling & Disposal
abh.	abhängig
Abs.	Absatz
AltautoV	Altautoverordnung
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMC-Formmassen	Bulk Moulding Compound – nicht flächenförmige Formmassen
BMW	Bayrische Motorenwerke
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrie Norm
DM	Deutsche Mark
ELV	End-of-Life Vehicles
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
f	feucht

g	Gramm
Gew.-%	Gewichts- Prozent
GF	Glasfaseranteil
GfK	glasfaserverstärkter Kunststoff
h	Stunde
H <sub>o</sub>	oberer Heizwert; der Brennwert H <sub>o</sub> (auch oberer Heizwert genannt) ist der Quotient aus der durch vollständige Verbrennung frei werdende Wärmemenge und der Masse des Stoffes, unter der Voraussetzung, daß die Temperatur des Brennstoffes vor dem Verbrennen und die seiner Verbrennungsprodukte 25 °C beträgt, das vor der Verbrennung im Brennstoff bereits vorhandene und durch die Verbrennung zusätzlich gebildete Wasser nach der Verbrennung in flüssiger Form vorliegt, die Verbrennungsprodukte von Kohlenstoff und Schwefel als Kohlendioxid und Schwefeldioxid gasförmig vorliegen und eine Oxidation des Stickstoffes nicht stattgefunden hat
IR- Spektrometer	Infrarot Spektrometer
ISO	International Standards Organisation
Kap.	Kapitel
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
KKBs	Kunststoffkraftstoffbehälter
km	Kilometer
kJ	Kilojoule
LFK	Lüftungskanäle
LKW	Lastkraftwagen

MBRVV	Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung vor der Verbrennung
Nr.	Nummer
öS	Österreichischer Schilling
Pkt.	Punkt
PKW	Personenkraftwagen
PRAVDA	Projektgruppe Altautoverwertung der deutschen Automobilindustrie
RECAP	Recycling of Automobile Plastics
Recycling	die erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten in Form von Kreisläufen
RESH	Reststoffe aus Shredderanlagen
RIM-Polyurethene	Reactive Injection Moulding Polyurethene
RL	Richtlinie
Rostf.	Rostfeuerung
RVL Lenzing	RVL Reststoffverwertung Lenzing GMBH
S.	Seite
SFE	Stoßfängerelemente
SMC-Harzmatten	Sheet Moulding Compound – flächenförmige Harzmatten
SRF	Schweizer Franken
Stand der Technik	nach Gewerbeordnung § 71 a und Abfallwirtschaftsgesetz § 2(8) ist der Stand der Technik, der auf den einschlägigen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Entwicklungsstand fortschrittlicher technologischer Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, deren Funktionstüchtigkeit erprobt und erwiesen ist. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen



heranzuziehen. Die EU verlangt in einer Richtlinie den Einsatz der besten verfügbaren Technologie (Best Available Technology BAT) und berücksichtigt damit auch wirtschaftliche Komponenten, insbesondere, ob einzelne Verfahren in bestimmten Branchen bereits Einzug gefunden haben oder möglicherweise durch Patente so geschützt sind, daß sie nicht allgemein zugänglich sind (Homepage der Wirtschaftskammer: [www.wko.at](http://www.wko.at))

t	Tonne
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
tr	trocken
TS	Trockensubstanz
USA	United States of America
USG	Umweltschutzgesetz
usw.	und so weiter
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
v.a.	vor allem
VCC	Veba-Combined-Cracking-Verfahren
VDA	Verein Deutscher Automobilhersteller
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDIK	Verband der Importeure von Kraftfahrzeugen
vgl.	vergleiche
VSAI	Vereinigung Schweizerischer Automobilimporteure
VW	Volkswagen
WWB	Wischwasserbehälter
z.B.	zum Beispiel

Ziff.	Ziffer
z.Z.	zur Zeit



## 7.3 Tabellen

TABELLE 2.1	ZIELVORGABEN DER EUROPÄISCHEN AUTORICHTLINIE .....	12
TABELLE 3.1	MATERIALANTEILE AM LEERGEWICHT VON PKWS BEI IHRER VERSCHROTTUNG; DURCHSCHNITTLICHE LEBENSDAUER ETWA ZEHN JAHRE .....	17
TABELLE 5.1	CHEMISCHE VERTRÄGLICHKEIT WICHTIGER KUNSTSTOFFE.....	29
TABELLE 5.2	GEBRÄUCLICHE ADDITIVE.....	30
TABELLE 5.3	PROJEKTEÜBERSICHT .....	32
TABELLE 5.4	AUSWAHL EINIGER PROJEKTE ZUR STOFFLICHEN VERWERTUNG VON THERMOPLASTEN.....	38
TABELLE 5.5	MITWIRKENDE FIRMEN AM PRAVDA 2 PROJEKT .....	40
TABELLE 5.6	WERKSTOFFPOTENTIAL .....	40
TABELLE 5.7	EINGESETZTE ALTTEILEFRAKTIONEN.....	41
TABELLE 5.8	VERGLEICH DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN VON KKB-MAHLGUT UND NEUWARE .....	41
TABELLE 5.9	AUSZUG DER BMW LABORERGERBNISSSE AN BAUTEILMUSTERN AUS KKB-REZYKLAT.....	42
TABELLE 5.10	KOSTENVERGLEICH WERKSTOFFLICHE VERWERTUNG VON ALT-KKB AUS PE MIT PE- NEUWAREPREIS .....	42
TABELLE 5.11	VERGLEICH DER SPEZIFIKATIONEN FÜR STOßFÄNGERMATERIAL VON 9 FAHRZEUGTYPEN MIT DREI REZYKLATTYPEN EMPP .....	43
TABELLE 5.12	MATERIALKENNWERTE ABS-NEUWARE, REZYKLAT MIT 20% ALTMATERIALANTEIL UND NAß AUFBEREITETES MAHLGUT AUS ALTFahrzeUGEN .....	45
TABELLE 5.13	MATERIALEIGENSCHAFTEN VON ABS BEIM SORTENREINEN RECYCLING VON VW- KÜHLERGRILLEN .....	46
TABELLE 5.14	REZYKLATKOSTEN FÜR 100 % ABS-ALTMATERIAL .....	47
TABELLE 5.15	VERGLEICH VON PA-REZYKLAT UND NEUWARE, GRANULAT-PRÜFUNG.....	48
TABELLE 5.16	VERGLEICH VON PA-REZYKLAT UND NEUWARE, PRÜFUNG AN PRÜFKÖRPERN.....	49
TABELLE 5.17	MATERIALEIGENSCHAFTEN VON ABS+PMMA REZYKLATEN.....	51
TABELLE 5.18	TYPISCHE EIGENSCHAFTEN VON FLOCKENVERBUNDSCHAUMSTOFFEN.....	53
TABELLE 5.19	TYPISCHE EIGENSCHAFTEN VON FORMSCHAUMSTOFFEN MIT UND OHNE MAHLGUTEINARBEITUNG .....	55

TABELLE 5.20 VERGLEICH MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN EINER STOßFÄNGERVERKLEIDUNG AUS 100%-IGER NEUWARE (A) MIT EINER STOßFÄNGERVERKLEIDUNG DIE 10 % FÜLLSTOFF IN FORM VON GEMAHLENE LACKIERTEN STOßFÄNGERN ENTHÄLT (B).....	57
TABELLE 5.21 ABDECKUNG HECKENTLÜFTUNG DES BMW 850 I, VERGLEICH ORIGINALTEIL (GEMISCH AUS LACKIERTEN TEILEN MIT 15 BZW. 20% GLASFASERN, LACKIERT) MIT FLIEßGEPREßTEM TEIL AUS GRANULAT (0,2-0,5 MM) .....	59
TABELLE 5.22 ANWENDUNGEN VON SMC-REZYKLATEN IN SERIENBAUTEILEN .....	61

## 7.4 Abbildungen

ABBILDUNG 1.1 VERRINGERUNG DER WERKSTOFFVIELFALT .....	5
ABBILDUNG 1.3 KUNSTSTOFFEINSATZ IN DER BMW 3ER REIHE (328i), BAUJAHR 1998.....	6
ABBILDUNG 3.1 AUTODEMONTAGE / MATERIALSTRÖME.....	18
ABBILDUNG 4.1 KUNSTSTOFFVERBRAUCH NACH SORTEN IN DER FAHRZEUGINDUSTRIE .....	25
ABBILDUNG 4.2 MONOMERE AUS DENEN WICHTIGE THERMOPLASTISCHE KUNSTSTOFFE AUFGEBAUT SIND. ....	26
ABBILDUNG 4.3 SCHEMATISCHE ANORDNUNG DER MOLEKÜLE IN THERMOPLASTEN .....	26
ABBILDUNG 5.1 KRITERIEN BEIM MATERIALRECYCLING .....	32
ABBILDUNG 5.2 VERKÜRZUNG DER MAKROMOLEKÜLE DURCH MECHANISCHE ODER THERMISCHE EINFLÜSSE HAT EINEN FESTIGKEITSABFALL ZUR FOLGE .....	35
ABBILDUNG 5.3 VERFAHRENSSCHEMA BEIM REGRANULIEREN .....	36
ABBILDUNG 5.4 EINFLUß REZYKLATANTEIL AUF STEIFIGKEIT EINES POLYPROPYLEN-ELASTOMERS.....	37
ABBILDUNG 5.5 RECYCLING GEBRAUCHTER LKW-KÜHLWASSERKÄSTEN – VISKOSITÄT VON POLYAMID 66-REZYKLAT (GLASFASERANTEIL GF 30%, WÄRMESTABILISIERTE) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER LKW-LAUFLEISTUNG .....	48
ABBILDUNG 5.6 POLYURETHANVERBRAUCH 1991 IN WESTEUROPA.....	52
ABBILDUNG 5.7 PRINZIP DES WALZMAHLVERFAHRENS .....	54
ABBILDUNG 5.8 TEILCHENGRÖßENVERTEILUNG VON PUR-WEICHSCHAUMPULVER, HERGESTELLT DURCH WALZMAHLEN .....	54
ABBILDUNG 5.9 ABLAUFDIAGRAMM EINES DREI-STROM-RIM-PROZESSES .....	56
ABBILDUNG 5.10 FLIEßPREßVERFAHREN FÜR PUR-RIM-FORMTEILE.....	58

ABBILDUNG 5.11	NEUES SMC-VERFAHREN FÜR DAS AUFSTREUEN DER REZYKLAT-GROBFRAKTION .....	60
ABBILDUNG 5.12	RELATIVE ROHSTOFFKOSTEN FÜR EINE SCHALLKAPSEL .....	61
ABBILDUNG 5.13	REIßFESTIGKEIT UND REIßDEHNUNG (MIT UND OHNE OBERFLÄCHENMODIFIKATION).....	63
ABBILDUNG 5.14	KONZEPT DER ROHSTOFFLICHEN VERWERTUNG .....	64
ABBILDUNG 5.15	WEGE ZU FLÜSSIGEN PRODUKTEN AUS ALTKUNSTSTOFFEN UND IHRE VISKOSITÄTEN ...	65
ABBILDUNG 5.16	THERMISCHE AUFBEREITUNG IM RÜHRKESSEL (VEBA-ÖL) .....	67
ABBILDUNG 5.17	EXTRUDERKASKADE ZUR DEGRADATIVEN EXTRUSION .....	68
ABBILDUNG 5.18	GASGEHALT IM DEGRADIERTEM PRODUKT (GEMISCHTER KUNSTSTOFFABFALL MIT 10% PVC) .....	68
ABBILDUNG 5.19	GRUNDREAKTIONEN BEI DER HYDRIERUNG VON KUNSTSTOFFEN .....	69
ABBILDUNG 5.20	HYDRIERUNG VON KUNSTSTOFFRESTSTOFFEN BEI DER KOHLE-ÖL-ANLAGE BOTTROP .	70
ABBILDUNG 5.21	WIRBELSCHICHT-PYROLYSE-RECYCLING VON KUNSTSTOFFEN.....	71
ABBILDUNG 5.22	SCHEMA EINER DELAYED-COKING ANLAGE .....	71
ABBILDUNG 5.23	SYNTHEGASERZEUGUNG UNTER EINBINDUNG DER DEGRADATIVEN EXTRUSION .....	73
ABBILDUNG 5.24	CHEMISCHE REAKTIONEN IM HOCHOFEN .....	75
ABBILDUNG 5.25	DURCHSCHNITTLICHER ROHÖLVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND .....	76
ABBILDUNG 5.26	HEIZWERTE VERSCHIEDENER WERK- UND BRENNSTOFFE .....	77
ABBILDUNG 5.27	GEBRÄUCLICHE ROSTSYSTEME .....	78
ABBILDUNG 5.28	ANLAGENSCHEMA EINER VERBRENNUNGSANLAGE .....	79
ABBILDUNG 5.29	AUFBAU STATIONÄRE, ROTIERENDE UND ZIRKULIERENDE WIRBELSCHICHT .....	80
ABBILDUNG 5.30	PRINZIPSCHEMA ZEMENTPRODUKTION .....	82
ABBILDUNG 5.31	SAUERSTOFFBRENNER.....	83
ABBILDUNG 5.32	STRÖMUNGEN IM DREHROHROFEN .....	84