

---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5503

# **Recycling von PVC**

**Grundlagen, Stand der Technik,  
Handlungsmöglichkeiten**

**R. Möller, U. Jeske**

Abteilung für Angewandte Systemanalyse  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

Januar 1995

---



**FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

**Technik und Umwelt  
Wissenschaftliche Berichte**

FZKA 5503

# **Recycling von PVC**

**Grundlagen, Stand der Technik,  
Handlungsmöglichkeiten**

***Rolf Möller, Udo Jeske***

Abteilung für Angewandte Systemanalyse  
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1995

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

# Recycling von PVC

*Grundlagen, Stand der Technik, Handlungsmöglichkeiten*

---

## **Kurzfassung**

Die seit vielen Jahren andauernde Kritik der Chlorchemie richtet sich besonders auch auf die PVC-Produktion und ihre Folgen, derzeit steht das PVC-Recycling im Blickpunkt.

Der mögliche Beitrag des Recyclings zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung wurde genauer untersucht und formelmäßig beschrieben. Stoffliches Recycling findet auf unterschiedlichen "energetischen Niveaus" aufgewendeter Herstellenergie statt, je nachdem, ob es sich um Produkte, Materialien oder Rohstoffe handelt. Je weniger Produkte zu Materialien und Rohstoffen aufgelöst werden, desto mehr gespeicherte Herstellenergie kann in Form von Einsparung zusätzlicher Energie für die erneute Produktion genutzt werden. Für die Berechnung der Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung sowie HCl-Recycling, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und CO<sub>2</sub>-Minderung wurden die notwendigen Gleichungen abgeleitet.

Der Stand des PVC-Recyclings in der Praxis wurde durch Besichtigungen von Demonstrationsanlagen und Gespräche mit Vertretern der PVC-Industrie für wichtige PVC-Bauprodukte (Fenster, Rohre, Bodenbeläge, Folien) ermittelt. Die Ergebnisse werden beschrieben und künftige PVC-Recyclingpotentiale werden abgeschätzt.

Offene Fragen im PVC-Stoffstrom, Energie- und Kostenaspekte, Entsorgungsmöglichkeiten von nicht rezyklierbaren PVC-Altprodukten sowie Handlungsmöglichkeiten werden diskutiert.

## **Wichtige Ergebnisse:**

*Das sortenreine Materialrecycling von PVC-Altprodukten ist für bestimmte Produktlinien technisch möglich, rohstoff-/energiesparend und zum Teil bereits wirtschaftlich. Der mengenmäßige Umfang könnte mittelfristig einmal 15 – 30 % der Neuproduktion (Inlandverbrauch) ausmachen. Deshalb sollten hohe Materialrecyclingquoten angestrebt werden. Materialrecycling kann das Ressourcenproblem zwar entschärfen aber nicht lösen. Bei Kunststoffen kann CO<sub>2</sub>-Minderung nennenswert nur durch werkstoffliches Recycling mit möglichst hohen Quoten erreicht werden. Für den größten Teil der entstandenen und entstehenden PVC-Altprodukte (größer 70 %) ist die Entsorgung bis auf weiteres offen. Rohstoffrecycling (Salzsäure-Rückgewinnung) könnte an den zu hohen Kosten und dem zu geringen Umweltentlastungseffekt scheitern.*

# Recycling of PVC

## *Fundamentals, State of the Art, Possible Actions*

---

### **Abstract**

The criticism permanently expressed for many years with respect to chlorine chemistry has related in particular also to PVC production and its consequences. At present, PVC recycling is in the center of interest.

The possible contribution of recycling to conserving resources and relieving the environment has been studied in more detail and described by formulas. Material recycling takes place at different "energetic levels" of energy consumed in production, depending on whether products, materials or raw materials are involved. The smaller the number of products is which are decomposed into materials and raw materials, the more stored energy of production can be used in new production as savings of energy. The equations needed to calculate the energy equivalence with or without material recycling, with and without incineration and HCl recycling, stretching of resources, stretching of the capacity of landfills, and CO<sub>2</sub> reduction have been derived.

The status of PVC recycling in practice has been explored during visits to demonstration plants and in talks with representatives of the PVC industry as regards important PVC products in the construction industry (windows, tubes, floor coverings, foils). The results are described and future PVC recycling potentials estimated.

Open questions concerning the PVC material flow, energy and cost aspects, possible ways of disposal of used PVC products not amenable to recycling as well as possible actions are discussed.

### **Major Results:**

*Recycling of sort separated used PVC products is technically feasible for certain product lines, saves raw materials and energy, and is economically feasible. The amount capable of recycling could in the medium run account for 15 – 30 % of new production (home consumption). Therefore, high percentages of material recycling should be aimed at. Although material recycling will alleviate the problem of available resources, it cannot solve it. In case of plastics, substantial reduction of CO<sub>2</sub> generation can solely be achieved by recycling the highest possible portions of materials. For the majority of used PVC products (greater than 70 %) arisen or arising in the future the disposal path remains open for the time being. Raw material recycling (recovery of hydrochloric acid) could fail on account of excessive costs and insufficient relieving effect on the environment.*

# Inhalt

Seite

## *Kurzfassung*

1. Einleitung .....	1
2. Bedeutung des Recyclings .....	3
3. Recyclingformen, Behandlungsprozesse, Behandlungsschritte .....	5
3.1 Stoffliches Recycling (Begriffe und Definitionen) .....	5
3.1.1 Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung ohne Recycling .....	8
3.1.2 Ressourcenschonung und Umweltentlastung durch Recycling .....	9
3.1.3 Idealisierte Recyclinggleichung .....	10
3.2 Recyclinggleichung für $N = n \cdot m$ Nutzungen des Stoffes .....	13
3.2.1 $n$ -fache Materialnutzung .....	13
3.2.2 $m$ -fache Produktnutzung .....	14
3.3 Stoffabgabe an die Umwelt .....	14
3.3.1 Eingesparte Stoffmenge .....	15
3.3.2 Ressourcenstreckung .....	15
3.4 Energetisches Recycling (Energiekonservierung) .....	18
3.4.1 Herstellenergierecycling und Beseitigungsenergievermeidung .....	18
3.4.2 Verbrennungsenergieverwertung .....	22
3.5 Recycling von Polymeren .....	23
3.5.1 Primärenergiebedarf und Verbrennung bei Materialien .....	23
3.5.2 Primärenergiebedarf und Recycling bei Materialien und Produkten .....	29
3.5.3 Materialrecycling (Wieder- oder Weiterverwertung) .....	30
3.5.4 Produkt- und Materialrecycling .....	32
3.5.5 Die Recycling-Illusion .....	32
3.5.6 Ressourcenstreckung und Deponieschonung .....	35
3.5.7 Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Erzeugung .....	37
3.5.8 Vergleich PVC und PE .....	39
3.6 Energieaufwand und Recycling bei Kunststoffen (Zusammenstellung der Gleichungen) .....	42

	Seite
4. Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling – Grundsätzliche Betrachtungen .....	45
4.1 PVC-Begriffsklärung .....	45
4.2 Lebensphasen des PVC .....	50
4.3 Energiebedarf – Vergleich Neuproduktion / Materialrecycling .....	59
4.3.1 Energiebedarf für Neu-PVC .....	59
4.3.2 Energiebedarf für Recycling-PVC .....	64
4.3.3 Energieeinsparungspotential durch PVC-Recycling .....	64
4.4 Technische Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling .....	71
5. Recyclingstrategien für PVC-Produkte .....	73
5.1 Gesamtnutzungszeitraum und zeitabhängige Vorgänge .....	73
5.1.1 Produktebene .....	74
5.1.2 Bauteilebene / Komponenten .....	76
5.1.3 Materialebene .....	76
5.1.4 Rohstoffebene .....	77
5.2 Stoff-, Energie- und Geldströme .....	77
5.3 Recyclingformen .....	77
5.4 Integriertes, materialorientiertes und produktgruppenbezogenes Recyclingkonzept .....	79
5.5 Zwischenbilanz .....	81
6. Stand des PVC-Recycling nach Literaturangaben – Größenordnung der PVC-Recyclingmengen .....	82
7. PVC-Recycling in der Praxis .....	86
7.1 PVC-Fensterprofile .....	86
7.2 PVC-Rohre .....	97
7.3 PVC-Bodenbeläge .....	101
7.4 PVC-Folien .....	105

	<b>Seite</b>
7.5 Recycling von PVC-Produkten aus anteilig kleinen Sektoren .....	112
<b>8. Wesentliche Erkenntnisse aus praktischem PVC-Recycling .....</b>	<b>114</b>
8.1 Technische Recyclingpotentiale auf der Basis von praxisnahen Demonstrationsanlagen und Testversuchen .....	115
8.2 Abgeschätzte Recyclinganteile einer künftigen Produktion .....	115
8.2.1 Mengenanteile bei gleichbleibendem Verbrauchsverhalten auf Basis der gesamten Neuproduktion .....	115
8.2.2 Entwicklung der Mengenanteile der Hauptanwendungsbereiche auf der Basis gleichbleibenden Inlandverbrauchs .....	118
8.2.3 Obere Grenze für werkstoffliches Materialrecycling .....	120
8.3 Bewertung des Materialrecyclings der vier wesentlichen betrachteten Produktgruppen .....	122
8.3.1 Fensterprofile .....	122
8.3.2 Rohre .....	123
8.3.3 Bodenbeläge .....	123
8.3.4 Folien .....	124
<b>9. Kosten für Neu-PVC und Recycling-PVC .....</b>	<b>125</b>
<b>10. Alternative Programme zum Materialrecycling .....</b>	<b>128</b>
10.1 Hydrierung .....	128
10.2 Verbrennung von PVC mit HCl-Rückgewinnung .....	130
<b>11. Kostenschleifen – mögliche Problemlösung .....</b>	<b>133</b>
<b>12. Offene Fragen im PVC-Stoffstrom .....</b>	<b>137</b>
<b>13. Handlungsmöglichkeiten .....</b>	<b>139</b>
<b>14. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen .....</b>	<b>141</b>
<b>Quellen .....</b>	<b>151</b>

# Tabellen

	Seite
<b>Tabelle 1:</b> Recyclingformen, Behandlungsprozesse und Behandlungsschritte .....	7
<b>Tabelle 2:</b> Herstellenergie $E_{FM}$ und Verbrennungsenthalpie $E_{VF}$ .....	28
<b>Tabelle 3:</b> Verhältnis von Frischmaterial-Herstellenergie zu Verbrennungsenthalpie ...	28
<b>Tabelle 4:</b> Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und $CO_2$ -Minderung bei einem fiktiven Kunststoff (ohne feste Verbrennungsrückstände und ohne Beseitigungsenergie $E_{FB}$ ) .....	38
<b>Tabelle 5:</b> Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und $CO_2$ -Minderung bei PVC und PE .....	41
<b>Tabelle 6:</b> Additive zur Herstellung von Kunststoffen, insbesondere von PVC-Produkten .....	48
<b>Tabelle 7:</b> Anwendungsbereiche von PVC .....	54
<b>Tabelle 8:</b> Verbrennungsenthalpie für PVC (MJ/kg) .....	60
<b>Tabelle 9:</b> Energieäquivalenzwerte für PVC (MJ/kg) .....	60
<b>Tabelle 10:</b> Umrechnungsfaktoren Primärenergie in elektrische Nutzenergie .....	61
<b>Tabelle 11:</b> Verarbeitungsenergieäquivalent (MJth/kg) .....	63
<b>Tabelle 12:</b> Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung sowie HCl-Recycling, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und $CO_2$ -Minderung bei PVC .....	70
<b>Tabelle 13:</b> Anfall und Verbleib von PVC-Reststoffen *) im produzierenden Gewerbe nach Angaben des statistischen Bundesamtes in Tonnen .....	82
<b>Tabelle 14:</b> PVC-Rückführungsmengen .....	84
<b>Tabelle 15:</b> fks-Rohrhersteller in den Niederlanden .....	97
<b>Tabelle 16:</b> PVC-Verwendung in Bodenbelägen .....	101
<b>Tabelle 17:</b> Die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag-Recycling .....	102
<b>Tabelle 18:</b> Materialrecycling von PVC, mittelfristige Entwicklung .....	119
<b>Tabelle 19:</b> Zeitliche Entwicklung berechneter Potentiale von post-consumer-Abfällen, verschiedene Bezugsgrößen .....	120

# Bilder

	Seite
<b>Bild 1:</b> Recyclingmöglichkeiten .....	6
<b>Bild 2:</b> Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung ohne Recycling .....	8
<b>Bild 3:</b> Vereinfachter Recyclingvorgang der für eine Nutzung (Produktion) benötigten Stoffmenge .....	10
<b>Bild 4:</b> Vereinfachter Recyclingvorgang für n Nutzungen des Materials .....	14
<b>Bild 5:</b> Streckungsfaktor $S_R$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Materialnutzungen $n$ mit der Recyclingquote $\alpha_A$ als Parameter .....	16
<b>Bild 6:</b> Recycling von Polymeren mit polymererhaltenden und polymeraufspaltenden Verfahren .....	24
<b>Bild 7:</b> Verarbeitungstemperaturen von Massenkunststoffen .....	49
<b>Bild 8:</b> Schritte im PVC-Lebensweg von der VC-Herstellung bis zur Deponie unter Einschluß von Recycling .....	51
<b>Bild 9:</b> Erzeugung von Vinylchlorid (VC) mit Verwendung von rezykliertem HCl .....	52
<b>Bild 10:</b> Kreisprozesse und Energieaufwand [MJ/kg] für Roh-PVC und PVC-Produkte ...	65
<b>Bild 11:</b> Massenfluß von Polyvinylchlorid 1987 .....	83
<b>Bild 12 a:</b> PVC für Fensterprofile – Inlandverbrauch und Export .....	87
<b>Bild 12 b:</b> Abfallentwicklung bei PVC-Fensterprofilen und 25-jähriger Lebensdauer .....	87
<b>Bild 13:</b> Hoechst Altfensterrezyklat, Thermostabilität vor und nach Rezyklierung, mit und ohne Nachstabilisierung .....	90
<b>Bild 14:</b> Hoechst Altfensterrezyklat, Kerbschlagzähigkeit vor und nach Rezyklierung, mit und ohne Zugabe von weiteren Schlagzähmachern .....	90
<b>Bild 15:</b> Fensterprofil der Firma Hüls Troisdorf (System Trocal-900-REC) mit Kern aus ca. 40 % Regenerat und Außenmantel aus ca. 60 % Neeware .....	91
<b>Bild 16:</b> Zinnstabilisiertes PVC, Abhängigkeit der Reststabilität von der Anzahl der Recyclingvorgänge (Regranulierung nach der Extrusion, ohne Gebrauch) ...	93
<b>Bild 17:</b> E-Modul von ungebrauchten (frischen) Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen .....	95

	<b>Seite</b>
<b>Bild 18:</b> pH-Stabilität bei CaZn – stabilisierten Profilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen .....	95
<b>Bild 19:</b> Kerbschlagzähigkeit ak23 von Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen .....	95
<b>Bild 20:</b> Wärmeformbeständigkeit (Vicat B) von Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen .....	95
<b>Bild 21:</b> Farbmessungen an PVC-Profilen (DOMEX) .....	96
<b>Bild 22:</b> Recycling von gebrauchten PVC- und PE-Rohren bei Firma Wavin, Niederlande .....	99
<b>Bild 23:</b> Skizze der AgPR-Recyclinganlage für gebrauchte PVC-Bodenbeläge .....	104
<b>Bild 24:</b> Fremdstoffteilchen in einer Folie mit Rezyklatanteil .....	108
<b>Bild 25:</b> WILMA - Wiederaufbereitungsanlage für PVC-Folien-Verschnitt .....	110
<b>Bild 26:</b> PVC-Produktpalette, Mengenanteile .....	116
<b>Bild 27:</b> Grundprinzip der Hydrierung von Massenkunststoffen .....	129
<b>Bild 28:</b> PVC-Recyclingkreise .....	133
<b>Bild A:</b> Ressourcenstreckung durch Materialrecycling .....	143
<b>Bild B:</b> Recyclingvorgang für n Nutzungen des Materials .....	145
<b>Bild C:</b> Energieeinsparung bei verschiedenen Recyclingszenarien für PVC und PE .....	146
<b>Bild D:</b> Deponiestreckung bei verschiedenen Recyclingszenarien für PVC und PE .....	147
<b>Bild E:</b> PVC-Recyclingkreise .....	148
<b>Bild F:</b> PVC-Mengen (mittelfristige Entwicklung, 2005) .....	149

## 1. Einleitung

Die Chlorchemie hat sich nach dem zweiten Weltkrieg zum stärksten Wirtschaftszweig der Chemieindustrie entwickelt. Innerhalb der Chlorchemie hat sich der Massenkunststoff Polyvinylchlorid (PVC) als der Hauptchlorverbraucher zu einem der wichtigsten Standardkunststoffe entwickelt und in alle Lebensbereiche Eingang gefunden. Weltweit werden rund 18 Millionen Tonnen PVC verbraucht, in Europa rund 5 Millionen Tonnen und in der BRD rund 1 Millionen Tonnen. Etwa 30 % der deutschen Chlorproduktion wird zur Herstellung von PVC verwendet.

Die seit vielen Jahren andauernde kritische Diskussion der Chlorchemie richtet sich besonders auch auf die PVC-Produktion und ihre Folgen. Zunächst mußte sich die PVC-Industrie mit den Schäden auseinandersetzen, die durch das krebserregende PVC-Vorprodukt Vinylchlorid (VC) hervorgerufen wurden, dann drehten sich die Diskussionen um die Freisetzung von Dioxinen und Furanen bei Verbrennungsvorgängen und in den letzten Jahren ist das Recyclingproblem im Zusammenhang mit immer weiter wachsenden Stoffströmen und zunehmenden Abfallproblemen ein wichtiger Ansatzpunkt der Kritik geworden.

Technische Maßnahmen zur drastischen Verringerung der VC-Emissionen in den 70er Jahren, in die Wege geleitete technische Maßnahmen zur Verringerung der Dioxin / Furan-Emissionen bei der Müllverbrennung und Programme mit einigen Pilotprojekten zum PVC-Recycling haben bisher dafür gesorgt, daß die PVC-Produktion weltweit kontinuierlich auf heute rund 18 Millionen Tonnen pro Jahr angestiegen ist und weiter ansteigt. Mit einem jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch von rund 20 kg zählen die Deutschen mit zu den größten PVC-Konsumenten.

Dieser Bericht behandelt das PVC-Recycling, er untersucht folgende Punkte:

- Bedeutung des Recycling
- Begriffe und Definitionen
- Produktrecycling, stoffliches und energetisches Recycling (Grundlagen, Formeln)
- Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling
- Stand des PVC-Recycling nach der Literatur
- PVC-Recycling in der Praxis
- Recyclingpotential von PVC
- Alternative Programme
- Handlungsmöglichkeiten.

Die Untersuchungen sind beispielhaft für ein Vielstoffgemisch unterschiedlicher Zusammensetzung mit brennbaren Anteilen. Insoweit sind die Ergebnisse weitgehend auf andere Stoffe/Stoffgemische anwendbar und übertragbar.

## 2. Bedeutung des Recyclings

In den Industriegesellschaften wird die *Durchflußwirtschaft* praktiziert. Rohstoffe und Energieträger werden für Produkte und Dienstleistungen aus der Umwelt entnommen. Nach der Gebrauchsphase werden die Produkte als Abfälle in der Umwelt deponiert. **Die verwendeten Stoffe durchfließen diesen Prozeß überwiegend nur einmal**, denn Rohstoffe und Energie sind für die Industrieländer relativ billig und im Übermaß verfügbar. In der Folge werden Produkte häufig nur einmal gebraucht und dann weggeworfen.

In den Industrieländern wird eine Entwicklung von der Durchflußwirtschaft zu einer umweltfreundlicheren *Kreislaufwirtschaft* angestrebt. Der **wiederholte Gebrauch von Stoffen** (Sekundärrohstoffe, Materialien, Produkte), damit einhergehend die zeitlich gestreckte Entnahme insbesondere von nichterneuerbaren Rohstoffen und Energieträgern aus der Umwelt (*Ressourcenschonung*) und insgesamt die **Verringerung des Schadstoffeintrags in die Umwelt** sind wesentliche Kriterien einer Kreislaufwirtschaft.

Die Antriebsenergien zur Entstehung und Entwicklung dieses Prozesses können veränderte Einstellungen zur zukünftigen Entwicklung sein, damit die Stoffentnahme aus der Umwelt, sowie der Energieverbrauch reduziert und der Eintrag anthropogen erzeugter / verursachter Stoffe in die Umwelt minimiert werden. Rohstoffe und Energieträger werden durch steuerliche Maßnahmen als knappes Umweltgut bewertet und teurer gemacht. Stoffe, Produkte und Materialien werden in unterschiedliche Mehrmals- / Mehrwegsysteme gelenkt.

Im üblichen Sprachgebrauch wurde für die bereits ablaufenden bzw. noch zu schaffenden Kreislaufprozesse der Begriff "**Recycling**" eingeführt. Hinter diesem Begriff verbergen sich in der heutigen Praxis jedoch noch die unterschiedlichsten Prozesse und er wird für die unterschiedlichsten Zielsetzungen verwendet, darunter:

### ● *Recyclingaktivitäten als absatzförderndes Argument*

Der Begriff Recycling wird aufgegriffen, weil er modern und aktuell ist, weil er positiv besetzt ist und weil er so den Absatz der Produkte fördern kann. In Broschüren, Zeitungsanzeigen, Rundfunk und Fernsehen wird mit dem Begriff Recycling Werbung betrieben, manchmal auch unseriöse Werbung. Diese Werbung wird teilweise durch experimentelle Untersuchungen, Pilotprojekte u. ä. unterstützt. Das Hauptziel bei dieser Art von Recyclingaktivitäten ist die Sicherung bzw. Steigerung der Neuproduktion, Stoff- und Energieeinsparung sind keine primären Ziele.

## *Bedeutung des Recyclings*

- *Recyclingaktivitäten zur teilweisen Wiederverwertung von Altstoffen im Sinne einer Produktverantwortung*

Hier ist das Hauptziel die möglichst weitgehende Schließung des Produktions- / Konsumptionskreislaufes im Sinne einer echten Produktverantwortung. Die Einsparung von Rohstoffen und Energie und damit die Verringerung der Umweltbelastung steht dabei im Vordergrund, außerdem die Wirtschaftlichkeit der Recyclingmaßnahmen im gesamten Kreislauf.

Beides gibt es auch im Zusammenhang mit den PVC-Diskussionen. Das gespielte Interesse und Scheinaktivitäten sollen an dieser Stelle nicht weiter verfolgt werden.

### **3. Recyclingformen, Behandlungsprozesse, Behandlungsschritte**

#### **3.1 Stoffliches Recycling (Begriffe und Definitionen)**

Stoffliches Recycling ist die *erneute Verwendung* oder die *Verwertung* von Produkten oder Teilen von Produkten<sup>1)</sup>.

Mit dem stofflichen Recycling verbunden ist die mögliche *Einsparung von Herstellenergie* im Vergleich zu einem Produktionsprozeß ohne rezyklierte Stoffe (*Herstellenergierecycling*). Brennbare Produkte oder deren Teile können zur *Wärmeerzeugung* weiterverwertet werden (*Verbrennungsenergierecycling*).

Die Begriffe zum Recycling werden zweckmäßigerweise den Recycling*kreislaufarten*, Recycling*formen* und Recycling*behandlungsprozessen* zugeordnet, siehe Bild 1 und Tabelle 1.

Danach werden folgende *Recycling-Kreislaufarten* unterschieden:

- *Recycling in der Gebrauchsphase* ist die Rückführung von gebrauchten Produkten in ein *weiteres Gebrauchsstadium* unter Nutzung der Produktgestalt (*Produktrecycling*) nach oder ohne Durchlauf eines Behandlungsprozesses, z. B. Aufarbeitung, Überholung.
- *Recycling in den Phasen vor und nach dem Gebrauch* ist die Rückführung von Stoffen in einen *neuen Produktionsprozeß* nach oder ohne Durchlauf eines Aufbereitungsprozesses; im Fall von Produkten unter Auflösung der Produktgestalt (*Materialrecycling*) oder unter Auflösung des Materials (*Rohstoffrecycling*):
  - *Produktionsabfallrecycling* ist die Rückführung von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Produktionsabfällen aus der Herstellung und Verarbeitung
  - *Altstoffrecycling* ist die Rückführung von Stoffen nach der Gebrauchsphase.

Der Strom von Stoffen, die für ein Produkt- oder Materialrecycling nicht mehr verwendet oder verwertet werden, endet entweder direkt in der *Deponie bzw. Umwelt (-deponie)* oder wird vorher noch durch *Verbrennung (thermische Behandlung)* oder *chemisch-physikalische Behandlung* umweltverträglicher gemacht (hygienisiert, inertisiert, neutralisiert etc.).

---

1) Hierzu wird auf das im VDI 2243-Entwurf (Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte) erarbeitete Material Bezug genommen.

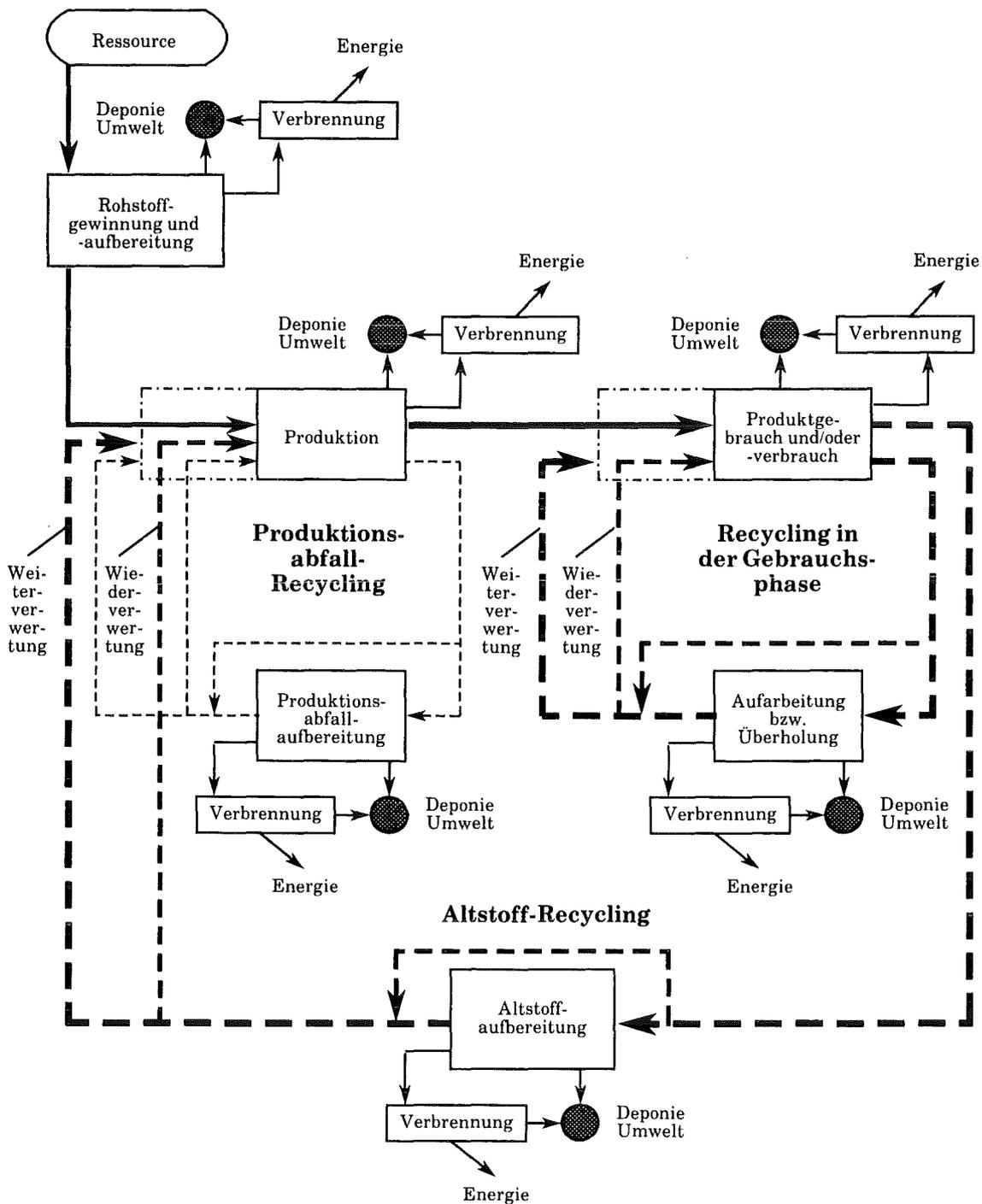


Bild 1: Recyclingmöglichkeiten (nach VDI 2243, Entwurf)

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach **Recyclingformen** in **Wieder- und Weiterverwendung** sowie **-verwertung** (nach VDI 2243-Entwurf).

- **Wiederverwendung** ist die erneute Benutzung eines gebrauchten Produkts (Altteils) für den gleichen Verwendungszweck wie zuvor (Beispiel: Mehrwegverpackung).

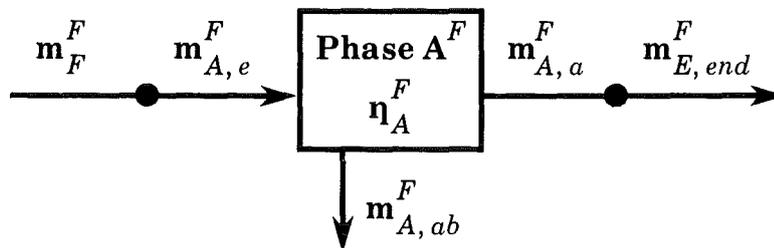
**Tabelle 1:** Recyclingformen, Behandlungsprozesse und Behandlungsschritte  
(nach VDI 2243, Entwurf)

		Recycling- form	Behandlungs- prozeß	Behandlungs- schritte	Beispiel	Sekundär- anwendung		
<b>Recycling während der Gebrauchsphase</b>	<b>Produktrecycling</b> (Gestalt bleibt erhalten)	Wiederverwendung	–	Keine	Nachfüllverpackung	Gleiche Anwendung		
					Schulbuchtausch			
			Aufarbeitung	Reinigen Prüfen	Mehrwegverpackung			
					Wartung			
					Zerlegen Bearbeiten Neubestücken		Kfz-Austauschmotor	
					Reifenrunderneuerung			
		Weiterverwendung	–	Keine	Einkaufstüte	Müllbeutel		
					Umarbeitung	Reinigen	Senfglas	Trinkglas
							Joghurtbecher u. a.	Tiefkühlbox
					Bearbeiten Neumontieren	Eisenbahnschwelle	Zaunpfahl	
Altreifen	Kinderschaukel							
<b>Produktionsabfallrecycling</b> <b>Altstoffrecycling</b>	<b>Materialrecycling</b> (Gestalt wird aufgelöst)	Wiederverwertung	–	Keine	Umschmelzen von Angüssen in Produktion	Gleiche Anwendung		
					Aufbereitung		Sortenreines Trennen und Klassifizieren Zerkleinern Reinigen Umschmelzen	Metallschrotte: Drehspäne, Edelmetalle ...
								Thermoplaste: Angüsse, Flaschenkästen ...
								Glas: Scherben, Weißglas
		Weiterverwertung	–	Keine	Stanzabfälle	Balastgewicht		
					Teer aus Kokerei	Asphalt		
			Aufbereitung	Richten, Stanzen	Trennen Zerkleinern Reinigen Neuabmischen	Stanzabfälle	Kleinteile	
						Automobilschrott	Baustahl	
					• Umschmelzen • Füllen	Gemischte Kunststoffe	Schallschutzwand	
						Kunststoffbatteriegehäuse Schlacke aus Stahlherstellung Duromerabfälle Elastomerabfälle Schaumstoffabfälle	Innenkotflügel Zementzusatz Kunststoff-Füllstoff Sportbelagzusatz Partikelverbund	
Chemisches Recycling	Pyrolyse/ Hydrolyse Elektrolyse/ Lösung	Altkunststoffe und Altöl zu hochwertigen Derivaten aufspalten	Neue Polymerisation von Kunststoffen					

- **Weiterverwendung** ist die erneute Benutzung eines gebrauchten Produkts für einen anderen Verwendungszweck (Beispiel: Senfglas  $\Rightarrow$  Trinkglas).
- **Wiederverwertung** ist der wiederholte Einsatz von Produktionsabfällen und Altstoffen in einem gleichartigen wie dem bereits durchlaufenen Produktionsprozeß (Beispiele: Metallschrotte, Glas, Thermoplaste).
- **Weiterverwertung** ist der Einsatz von Altstoffen und Produktionsabfällen bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen in einem von diesen noch nicht durchlaufenen Produktionsprozeß. Es entstehen Werkstoffe oder Produkte mit anderen Eigenschaften, Sekundärwerkstoffe (Beispiel: chemisches Recycling von Kunststoffen).

### 3.1.1 Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung ohne Recycling

Der mögliche Gewinn beim stofflichen Recycling ist die Einsparung auf der Rohstoffseite (Quellenwirksamkeit des Recyclings) und die Umweltentlastung auf der Entsorgungsseite (Abfallwirksamkeit). Als Bezugsgröße für den Gewinn wird die umgesetzte Stoffmenge bei einer bestimmten Vergleichanzahl Nutzungen  $N$  ohne Recycling gewählt. Diese Bezugsgröße wird im folgenden definiert. Herstellung und Verbrauch werden in der Phase  $A^F$  zusammengefaßt, vgl. Bild 2, in der die Stoffe mit einem Ausnutzungsgrad  $\eta_A$  verwertet werden.



**Bild 2:** Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung ohne Recycling

Die für eine Nutzung in die Phase  $A$  eingehende Stoffmenge  $m_{A,e}^F$  ist frisches Material  $m_F^F$  (der hochgestellte Index  $F$  für frisches Material wird im weiteren weggelassen).

$$m_{A,e} = m_F \quad (1)$$

und für  $N$  Nutzungen

$$M_{A,e} = M_F = N \cdot m_F \quad (2)$$

Die Stoffumwandlung zum Produkt und der Verschleiß in der Verbrauchsphase bedingen während der Phase  $A^F$  bei einer Nutzung Abgänge in die Umwelt  $\mathbf{m}_{A, ab}$ :

$$\mathbf{m}_{A, ab} = \left( \mathbf{1} - \boldsymbol{\eta}_A \right) \cdot \mathbf{m}_F \quad (3)$$

Die nach Gebrauch übrige Menge:

$$\mathbf{m}_{A, a} = \boldsymbol{\eta}_A \cdot \mathbf{m}_F \text{ bzw. } \mathbf{m}_{E, end} = \mathbf{m}_{A, a} \quad (4), (5)$$

verbleibt endgültig in der Umwelt und damit insgesamt die frisch erzeugte Stoffmenge, was klar ist.

Werden Produkte mit langjähriger Lebensdauer *neu* in den Markt gebracht und entstehen die ersten Abfälle erst nach Ablauf der Lebensdauer der Produkte, so wird in der Zwischenzeit bei wachsendem Markt die jährliche Produktionsmenge in der Verbrauchsphase gespeichert. Sie tritt dann jeweils lebenszeitverzögert wieder aus ihr heraus. So entsteht in der Gebrauchsphase ein Stoffberg, der umso höher ist, je länger die Lebensdauer ist.

Würde die jährlich produzierte Stoffmenge konstant bleiben, so wäre nach Ablauf der Lebenszeit die aktuelle Abfallmenge gleich groß wie die aktuelle Produktionsmenge (Sättigungsfall mit ausschließlich Ersatzproduktion). Steigt die jährliche Produktionsmenge mit expandierendem Markt an, so ist nach Ablauf der Lebenszeit die aktuelle Abfallmenge stets kleiner als die aktuelle Produktionsmenge (Expansionsfall).

### 3.1.2 Ressourcenschonung und Umweltentlastung durch Recycling

Wird ein Produkt in der Gebrauchsphase mehrfach genutzt, bevor das Material rezykliert wird, so ergibt sich eine **Gesamtnutzungszahl  $N$**  als Produkt aus **Materialnutzungszahl  $n$**  und **Produktnutzungszahl  $m$** .

$$N = n \cdot m \quad (6)$$

Die Stoffmenge, die zur Produktherstellung notwendig ist, kann auf die Anzahl  $m$  der Produktnutzungen umgelegt werden. Damit erhält man die auf eine Produktnutzung bezogene Stoffmenge.

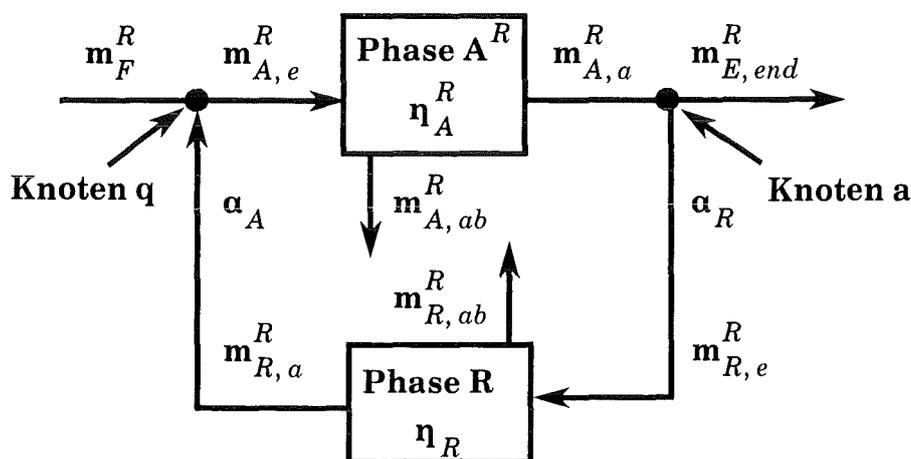
Nicht anders als beim Prozeß ohne Recycling **gelangt auch hier die gesamte der Umwelt entnommene und frisch produzierte Stoffmenge am Ende wieder in die Umwelt zurück**. Diese Menge ist für die gleiche Anzahl  $N$  Nutzungen

jedoch kleiner, woraus sich sowohl die Ressourcenschonung als auch in der Regel die Umweltentlastung ergibt.

### 3.1.3 Idealisierte Recyclinggleichung

Betrachtet wird der idealisierte Fall, daß sich Stoffe beliebig häufig ohne Qualitätseinbußen rezyklieren lassen.

Bild 3 zeigt einen vereinfachten Recyclingvorgang nach beliebig vielen vorausgegangenen Recyclingritten.



**Bild 3:** Vereinfachter Recyclingvorgang der für eine Nutzung (Produktion) benötigten Stoffmenge

Für den idealisierten Fall wird angenommen, daß sich das System in der Sättigung befindet und die Zugangsmengen der Phasen A<sup>R</sup> und R<sup>R</sup> genau so groß sind wie die Abgangsmengen.

Der Herstell- und Verbrauchsphase A<sup>R</sup> wird ein Recyclingprozeß Phase R<sup>R</sup> nachgeschaltet. Dadurch entstehen zwei herausgehobene Stoffverzweigungspunkte, die Knoten q und a. Am Knoten q wird durch die Zuführung von Rezyklat in Produktion und Verbrauch die frisch zu produzierende Stoffmenge verringert. Der Knoten q wird als *unmittelbar quellenwirksamer Knoten* gekennzeichnet.

Am Knoten a führt die Wieder- oder Weiterverwendung bzw. -verwertung von Stoffen zu einer Verminderung des sonst entstehenden Abfalls. Der Knoten a wird als *unmittelbar abfallwirksamer Knoten* gekennzeichnet. Es werden mehrere Annahmen getroffen:

- a) Für die Produktion in Phase  $A^R$  wird eine Mischung aus frischen und rezyklierten Stoffen (Rohstoffe / Materialien) angenommen:

$$\mathbf{m}_{A,e}^R = \mathbf{m}_F^R + \mathbf{m}_{R,a}^R \quad (7)$$

Mit dem Verhältnis

$$\alpha_A = \frac{\mathbf{m}_{R,a}^R}{\mathbf{m}_{A,e}^R} \text{ für die quellenwirksame eingangsseitige Recyclingquote} \quad (8)$$

von produktionsfertigem Rezyklat  $\mathbf{m}_{R,a}^R$  zu der für die Neuproduktion benötigten Stoffmenge  $\mathbf{m}_{A,e}^R$  ergibt sich für die notwendige frische Menge:

$$\mathbf{m}_F^R = \left(1 - \alpha_A\right) \cdot \mathbf{m}_{A,e}^R \quad (9)$$

- b) Nicht die gesamte in den Verbrauch gelangende Menge endet in der geordneten Entsorgung. Ein Teil gelangt direkt in die Umwelt bzw. verbleibt dort. Dieser Teil ist in  $\mathbf{m}_{A,ab}^R$  enthalten und im Ausnutzungsgrad  $\eta_A$  berücksichtigt.
- c) Nicht die gesamte in die geordnete Entsorgung gelangende Menge  $\mathbf{m}_{A,a}^R$  gelangt ins Recycling. Für den direkten Endverbleib vorgesehen ist die Differenzmenge:

$$\mathbf{m}_{E,end}^R = \mathbf{m}_{A,a}^R - \mathbf{m}_{R,e}^R \quad (10)$$

mit dem Verhältnis

$$\alpha_R = \frac{\mathbf{m}_{R,e}^R}{\mathbf{m}_{A,a}^R} \text{ für die abfallwirksame abgangsseitige Recyclingquote} \quad (11)$$

am Eingang in den Recyclingprozeß.

- d) Nicht die gesamte in den Aufbereitungsprozeß  $R$  eingebrachte Menge kommt aus dem Recyclingprozeß für die Neuproduktion heraus. Der nicht verwendete Anteil ist in  $\mathbf{m}_{R,ab}^R$  enthalten und im Ausnutzungsgrad  $\eta_R$  des Recyclingprozesses berücksichtigt.

Die Beziehungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen der Phasen  $A^R$  und  $R$  lauten:

$$\mathbf{m}_{A,a}^R = \eta_A \cdot \mathbf{m}_{A,e}^R \quad (12)$$

$$\mathbf{m}_{R,e}^R = \alpha_R \cdot \mathbf{m}_{A,a}^R \quad (13)$$

$$\mathbf{m}_{R,a}^R = \eta_R \cdot \mathbf{m}_{R,e}^R \quad (14)$$

Daraus ergibt sich die in die Neuproduktion zurückgeführte (rezyklierte) Stoffmenge:

$$\mathbf{m}_{R,a}^R = \eta_R \cdot \alpha_R \cdot \eta_A \cdot \mathbf{m}_{A,e}^R \quad (15)$$

Aus Gl. (9) folgt schließlich für die notwendige Menge frischer Stoffe:

$$\mathbf{m}_F^R = \left( 1 - \eta_R \cdot \alpha_R \cdot \eta_A \right) \cdot \mathbf{m}_{A,e}^R \quad (16)$$

und durch Vergleich mit Gl. (8) und (15) ergibt sich für die eingangsseitige quellenwirksame Recyclingquote:

$$\alpha_A = \eta_R \cdot \alpha_R \cdot \eta_A \quad (17)$$

Die rezyklierbare Menge ist, wie es nicht anders sein kann, die in der Prozeßkette verbleibende Stoffmenge. Ihr Anteil an der gesamten in die Phase A eingehenden Menge  $\mathbf{m}_{A,e}^R$  ist das Produkt aus den Umwandlungseffizienzfaktoren  $\eta_A$  und  $\eta_R$  sowie des Recyclinganteils an der entsorgten Stoffmenge, der abgangsseitigen abfallwirksamen Recyclingquote  $\alpha_R$ .

### ***Vereinfachung der benötigten Stoffmenge***

Für die hier angestellten grundsätzlichen Überlegungen wird angenommen, daß die für das rezyklierte Produkt benötigte Stoffmenge  $\mathbf{m}_{A,e}^R$  (eine Nutzung) gleich der für ein Produkt aus ausschließlich frischen Stoffen ist:

$$\mathbf{m}_{A,e}^R = \mathbf{m}_F^R \quad (18)$$

Mit Gl. (16), (17) und (18) ergibt sich die frisch zu produzierende Materialmenge unter Einschluß von Recycling zu:

$$\mathbf{m}_F^R = \mathbf{m}_F^R \cdot \left( 1 - \alpha_A \right) \quad (19)$$

Die frische Menge ist um den Anteil  $\alpha_A$  kleiner als ohne Recycling, vgl. Gl. (1).

### 3.2 Recyclinggleichung für $N = n \cdot m$ Nutzungen des Stoffes

#### 3.2.1 n-fache Materialnutzung

Nicht alle Materialien lassen sich beliebig oft rezyklieren. Nach einer Anzahl  $(n - 1)$  Wiederverwertungsschritten müssen sie ausgesondert und durch frische Ware ersetzt werden. Es wird deshalb jeweils bei der ersten von  $n$  Produktionen eine komplett frische Produktionsmenge zugrundegelegt, wonach sich  $(n - 1)$  Recyclingschritte anschließen.

So ergibt sich die benötigte frische Stoffmenge für  $n$  Materialnutzungen zu:

$$\mathbf{M}_F^R = \left( 1 + (n - 1) \cdot \left( 1 - \alpha_A \right) \right) \cdot \mathbf{m}_F \quad (20)$$

oder:

$$\mathbf{M}_F^R = n \cdot \mathbf{m}_F \cdot \left( 1 - \frac{n - 1}{n} \cdot \alpha_A \right). \quad (21)$$

In Gl. (21) erscheint die Recyclingquote um den Faktor  $(n - 1) / n$  verkleinert:

$$\frac{n - 1}{n} \alpha_A = \eta_R \cdot \alpha_R \cdot \eta_A^R. \quad (22)$$

Die verkleinerte Recyclingquote wird "effektive Recyclingquote"  $\alpha_{A, n}$  genannt.

$$\alpha_{A, n} = \frac{n - 1}{n} \cdot \alpha_A. \quad (23)$$

Dies soll mit Hilfe von Bild 4 in Anlehnung an die tatsächlichen Herstell- und Recyclingschritte erklärt werden. Gl. (21) wird dazu anders geschrieben:

$$\mathbf{M}_F^R = n \cdot \mathbf{m}_F \cdot \left( \left( 1 + \alpha_A / n \right) - \alpha_A \right). \quad (24)$$

Gegenüber Gl. (19) ist die frische Produktionsmenge jetzt um den Anteil  $\alpha_A / n$  größer. Diese Menge wird nicht zu Produkten verarbeitet, sondern aufgehoben (strichlierter Pfad in Bild 4), um den Verlust durch nicht wieder rezyklierbares Material auszugleichen.

Wird bei jeder frischen Fertigung ein Anteil  $\alpha_A / n$  mehr produziert, so ist nach  $n$  Schritten die Menge  $\alpha_A$  erreicht, die die gleiche mit dem letzten Recyclingschritt ausgesonderte Menge ersetzt. Der nächste Schritt besteht dadurch aus vollständig frischem Material. In Bild 4 ist dieser Vorgang auf  $n$  Schritte verteilt dargestellt, so daß nach jedem Schritt die Menge  $\alpha_A / n$  ersetzt wird.

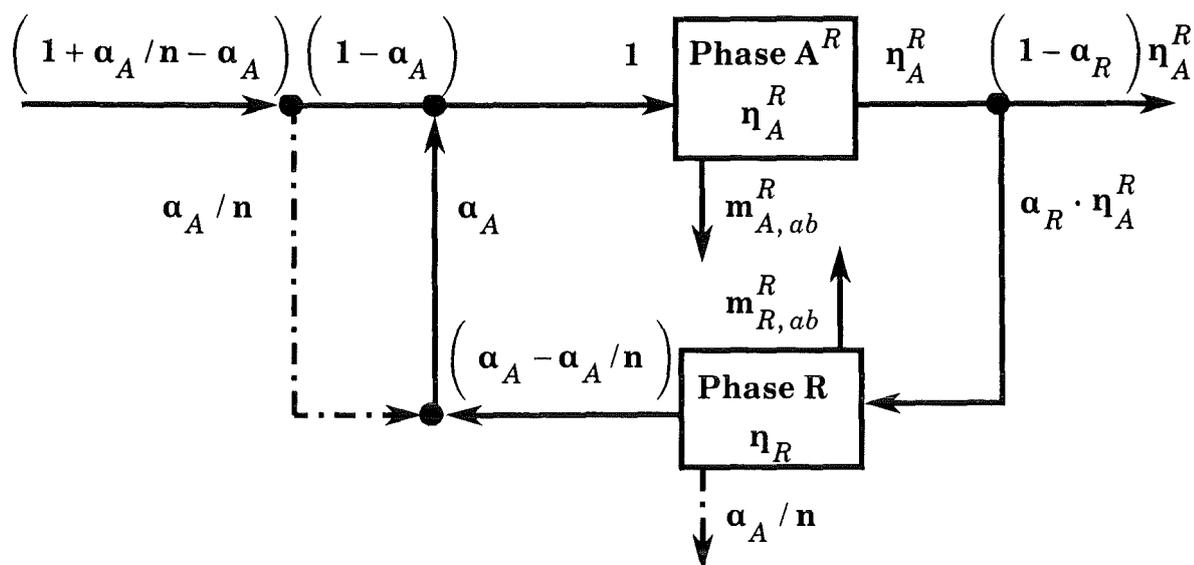


Bild 4: Vereinfachter Recyclingvorgang für  $n$  Nutzungen des Materials, bezogen auf  $n \cdot m_F$

### 3.2.2 m-fache Produktnutzung

Dieselbe Materialmenge wird benötigt, wenn  $m$  Produktnutzungen statt einer einzigen ( $m = 1$ ) erfolgen<sup>2)</sup>.

Insoweit ist die benötigte Stoffmenge von der Anzahl der Produktnutzungen unabhängig.

Die Umlage der Stoffmenge auf  $m$  Produktnutzungen kann durch  $N = m \cdot n$ , Gl. (6) in Gl. (21) deutlich gemacht werden, so daß ein direkter Vergleich mit Gl. (2) möglich wird. Es ergibt sich:

$$M_F^R = N \cdot m_F \cdot \frac{1}{m} \left( 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \alpha_A \right). \quad (25)$$

### 3.3 Stoffabgabe an die Umwelt

Die Menge  $M_{R_F}^R$  wird an die Umwelt abgegeben. Dafür müssen neben dem Recycling andere umweltverträgliche Entsorgungswege bereitstehen bzw. bereitgestellt werden. Weil ein bestimmter Anteil stets in der Umwelt verbleibt, müssen die Stoffe selbst umweltverträglich sein.

2) Hier wird von Verschleiß und Aufwendungen während der Nutzungen abgesehen.

### 3.3.1 Eingesparte Stoffmenge

Die *insgesamt eingesparte Stoffmenge* bei  $N$  Nutzungen ist die Differenz aus Gl. (2) und Gl. (25):

$$\Delta M_F = N \cdot m_F \left[ 1 - \frac{1}{m} \left( 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \alpha_A \right) \right]. \quad (26)$$

Für eine einzige Produktnutzung ( $m = 1$ ) ergibt sich:

$$\Delta M_F = (n - 1) \cdot \alpha_A \cdot m_F. \quad (27)$$

### 3.3.2 Ressourcenstreckung

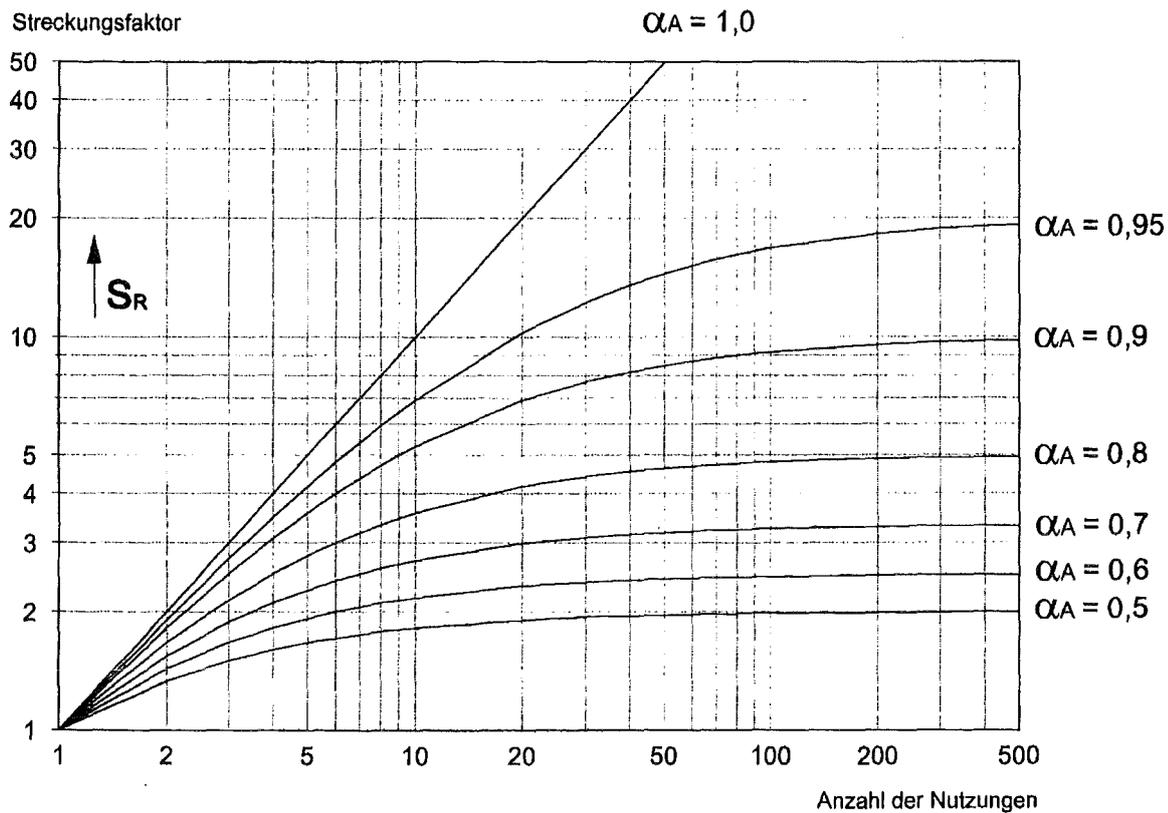
Die für  $N$  Nutzungen ohne Recycling verfügbare Menge  $M_F$  reicht mit Recycling für mehr Nutzungen und damit länger, wenn die Produktionsrate unverändert bleibt. Der durch Recycling mögliche Streckungsfaktor  $S_R$  der vorhandenen Ressource ergibt sich aus Gl. (2) und Gl. (22) zu:

$$S_R = \frac{M_F}{M_F^R} = \frac{m}{\left( 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \alpha_A \right)}. \quad (28)$$

Für den Fall einer einzigen Produktnutzung ( $m = 1$ ) ist in Bild 5 der Streckungsfaktor  $S_R$  einer Ressource in Abhängigkeit von der Anzahl der Materialnutzungen (Neuproduktionen)  $n$  für verschiedene Rezyklatanteile (Recyclingquoten) an der Neuproduktion  $\alpha_A$  logarithmisch aufgetragen.

Es gibt drei Sonderfälle bei  $m = 1$ :

1. Das Material wird zu 100 % wieder rezykliert:  $\alpha_A = 1$ . Dann ist der Streckungsfaktor gleich der Anzahl der Stoffnutzungen und die Kurve verläuft linear steigend:  $S_R = n$ . Der Fall  $\alpha_A = 1$  ist praktisch unmöglich.
2. Das Material wird nur einmal genutzt:  $n = 1$ . Es ergibt sich  $S_R = 1$ , die Ressource wird nicht gestreckt.
3. Der Recyclingvorgang wird beliebig oft wiederholt:  $n \rightarrow \infty$ .



**Bild 5:** Streckungsfaktor  $S_R$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Materialnutzungen  $n$  mit der Recyclingquote  $\alpha_A$  als Parameter, bei  $m = 1$

Der Streckungsfaktor ist dann nicht mehr von der Anzahl der Materialnutzungen abhängig. Es ergibt sich eine Gleichung für die horizontalen Asymptoten, denen sich  $S_R$  annähert:

$$S_R = \frac{1}{1 - \alpha_A} \quad (29)$$

Der Streckungsfaktor  $S_R^\infty$  ist nur noch vom Anteil  $\alpha_A$  des Rezyklats an der Neuproduktion abhängig und nur durch dessen Steigerung zu vergrößern.

Eine Steigerung der Nutzungszahlen  $n$  kann nur dann zu einer nennenswerten Streckung der Ressource führen, wenn der Anteil des Rezyklats an der Neuproduktion ebenfalls gesteigert wird.

Gl. (28) macht nochmals deutlich, daß eine Erhöhung der Zahl der Nutzungen keinen Sinn macht, wenn im Kreislauf zu große Mengen verloren gehen und durch frische Stoffe ersetzt werden müssen.

Hohe Umwandlungs- und Einsammlungswirkungsgrade sind für eine spürbare Streckung der Ressourcen und eine deutliche Umweltentlastung Voraussetzung.

Aus Gl. (28) und der Alltagserfahrung ergibt sich, daß dazu

- Produkte möglichst oft und lange gebraucht werden sollten,
- in der Herstellungs- und Verbrauchsphase möglichst wenig Abfälle entstehen dürfen und möglichst alle Stoffe über einen geordneten Entsorgungsweg erfaßt werden müssen,
- möglichst viele der entsorgten Stoffe auf den Recyclingweg gebracht werden,
- beim Recyclingprozeß ebenfalls möglichst wenig Abfälle entstehen dürfen.

**Beispiel:** Betrachtet wird eine einzige Produktnutzung  $m = 1$ . Angestrebt werde ein Rezyklat-Anteil von 80 % an der Neuproduktion:  $\alpha_A = 0,8$ . Dies stellt bereits hohe Anforderungen an die Teileffizienzen im Kreislauf  $\eta_A$ ,  $\alpha_A$  und  $\eta_R$ .

Angenommen, in der Herstellungs- und Verbrauchsphase würden 3 % des Stoffes an die Umwelt abgehen, also  $\eta_A = 0,97$  und im Recyclingprozeß 5 % des rezyklierten Stoffes, also  $\eta_R = 0,95$ . Dann müßte der zurückgeführte (eingesammelte) Anteil des gebrauchten Stoffes / Material mit Gl. (16)

$$\alpha_R = 86,8 \%$$

sein. Das bedeutet z. Zt. eine undenkbar hohe Anforderung an die Sammellogistik.

Die Ressourcenstreckung wäre um einen Faktor  $S_R = 3,5$  bei 10-fachem Stoffrecycling oder einen Faktor  $S_R = 5$  bei 100-fachem Stoffrecycling möglich.

#### Fazit:

*Damit wird deutlich, daß Materialrecycling das Ressourcenproblem zwar entschärfen, aber nicht lösen kann. Bei deutlich wachsender Weltbevölkerung und anhaltender Konsumsteigerung wäre die erreichte Reserve schnell aufgebraucht. Wird das Augenmerk auf die Effizienzsteigerung beim Stoffeinsatz gelegt, so gehört dazu, daß auch die Menge eines Stoffes, die zur Befriedigung eines Bedürfnisses / eines Wunsches oder zur Erledigung einer Aufgabe eingesetzt wird, so klein wie möglich gemacht und die Lebensdauer von Produkten (wieder) gesteigert wird.*

*Schließlich wird es unumgänglich werden, auch den Sinn des Produktes / der Dienstleistung zu hinterfragen, für die Stoffe genutzt werden bzw. genutzt werden sollen und dies unter Gesichtspunkten des Ressourcen- und Umweltschutzes abzuwägen.*

### **3.4 Energetisches Recycling (Energiekonservierung)**

#### **3.4.1 Herstellenergierecycling und Beseitigungsenergievermeidung**

Zur Erzeugung eines Produkts muß auf den unterschiedlichen Prozeßstufen von der Rohstoffbereitstellung bis zur Herstellung Energie aufgewendet werden, die die Gestalt des Produkts (den "Ordnungszustand") bestimmt. Die **Herstellenergie** ist der **aufaddierte und auf den Stoff bezogene Energieaufwand** der verschiedenen Prozeßstufen bis hin zum endgültigen Produkt. Die Produktgestalt ist ein Äquivalent für die Herstellenergie, sie ist ihr gedachter Speicher. **Stoffliches Recycling findet auf unterschiedlichen "energetischen Niveaus" aufgewendeter Herstellenergie statt**, je nachdem, ob es sich um Produkte, Materialien oder Rohstoffe handelt. Das höchste "energetische Niveau" haben die Produkte. Bei der Auflösung der Produktgestalt oder des Materials im stofflichen Recyclingvorgang geht die zuvor aufgewendete Herstellenergie für die jeweilige Produktstufe verloren. Bei der erneuten Herstellung von Produkten aus Materialien von zuvor aufgelösten Produkten muß sowohl zur Auflösung, als auch für die Herstellung erneut Energie aufgewendet werden.

Je weniger die Produkte zu Materialien und Rohstoffen aufgelöst werden, desto mehr gespeicherte Herstellenergie kann in Form von Einsparung zusätzlicher Energie bei der erneuten Produktion genutzt werden.

Übersteigt die zur Auflösung notwendige Energie die Herstellenergie auf der betrachteten Stufe, so kann mit dem Recycling zwar Rohstoffschonung, nicht aber Energieeinsparung erreicht werden. Ist der Energieaufwand zur Auflösung kleiner als der zur erneuten Herstellung, so kann von einem mit dem stofflichen Recycling verbundenen energetischen Recycling gesprochen werden. Die an die Gestalt gebundene Herstellenergie wird beim wiederholten Gebrauch soweit "wieder- oder weiterverwendet", wie die Gestalt *nicht* aufgelöst wird. Wieder- oder Weiterverwertung ist demnach nicht möglich, weil dabei die Gestalt aufgelöst würde.

- **Herstellenergierecycling** ist die Nutzung des an die Gestalt der Materialien gebundenen Energieäquivalents aus der Herstellung / Verarbeitung (der Rohstoffe, Materialien und Produkte) in einer neuen Gebrauchsphase oder in einem erneuten Produktionsprozeß in Form von **Einsparung der sonst notwendigen Herstellenergie**.

Rezyklierte Produkte müssen nicht konditioniert und in der Umwelt abgelagert werden. Der dafür sonst notwendige Beseitigungsenergieaufwand entfällt.

- **Beseitigungsenergievermeidung** durch Recycling ist die Vermeidung von sonst notwendigem Energieaufwand für die endgültige Konditionierung und Ablagerung der gebrauchten Produkte / Reststoffe in der Umwelt.

Für eine bestimmte Menge  $m^{R_{A,e}}$  eines Produktes wird für die **Rohstoff- und Materialherstellung der Frischware** die Energie  $E_{FM}$  benötigt. Die **Herstellung des Produkts** erfordert die Energie  $E_{FP}$ , vermehrt um einen Anteil  $\beta$ , zur Berücksichtigung eines Mehraufwandes bei Verwendung von frischen und rezyklierten Stoffen in einem gemeinsamen Produktionsvorgang:

$$E_P^R = E_{FP} \cdot (1 + \beta). \quad (30)$$

Für das **Recycling** wird Entsorgungsenergie  $E_E$ , Aufbereitungsenergie  $E_A$  und Energie zur Herstellung verarbeitungsfähiger Stoffe / Materialien  $E_M$  benötigt, die in der Recyclingenergie  $E_R$  zusammengefaßt werden:

$$E_R = E_E + E_A + E_M. \quad (31)$$

Für die **Beseitigung / Ablagerung der Reststoffe** muß Beseitigungsenergie  $E_{FB}$  aufgewendet werden (Transport, chemisch-physikalische Behandlung, Verbrennung, Deponie u. ä.). Materialherstellenergie und Beseitigungsenergie werden zur **Durchlaufenergie**  $E_{FD}$  zusammengefaßt:

$$E_{FD} = E_{FM} + E_{FB}. \quad (32)$$

Das **Verhältnis von Recyclingenergieaufwand  $E_R$  zum Materialdurchlaufenergieaufwand frischer Stoffe  $E_{FD}$**  sei:

$$\alpha_E = E_R / E_{FD} \quad (\text{Recyclingenergie-Quote}). \quad (33)$$

Für  $n$  Nutzungen **ohne Recycling** wird als Gesamtenergie benötigt:

$$E_{F,n} = n \cdot \left( E_{FD} + E_{FP} \right). \quad (34)$$

Für  $n$  Nutzungen **mit Recycling** wird die Herstellenergie für **ein** Produkt aus frischen Stoffen und  $(n - 1)$  mal die Herstellenergie für das Recyclingprodukt benötigt. Für den Anteil  $(1 - \alpha_A)$  an Frischware muß die Materialdurchlaufenergie  $E_{FD}$ , Gl. (32), angesetzt werden, wohingegen sie für den rezyklierten Anteil  $\alpha_A$  entfällt. Für diesen Anteil ist die Recyclingenergie  $E_R$  aufzuwenden, Gl. (31). Hin-

zu kommt für diesen Anteil der Aufwand für die Herstellung des Produktes  $E_{R,n}$ , Gl. (30). Es ergibt sich:

$$E_{R,n} = \left( E_{FD} + E_{FP} \right) + (n-1) \cdot \left[ \left( 1 - \alpha_A \right) \cdot E_{FD} + E_R \cdot \alpha_A + (1 + \beta) \cdot E_{FP} \right], \quad (35)$$

bzw.:

$$E_{R,n} = n \left[ \left( 1 - \frac{n-1}{n} \left( 1 - \alpha_E \right) \cdot \alpha_A \right) E_{FD} + \left( 1 + \frac{n-1}{n} \cdot \beta \right) \cdot E_{FP} \right]. \quad (36)$$

Für den vergrößerten Produktherstellungsaufwand wird ein "effektiver Mehraufwandfaktor"

$$\beta_n = \frac{n-1}{n} \beta \quad (37)$$

eingeführt. Gl. (36) wird damit und unter Verwendung der "effektiven Recyclingquote"  $\alpha_{A,n}$ , Gl. (23) neu geschrieben:

$$E_{R,n} = n \left[ \left( 1 - \alpha_{A,n} \cdot \left( 1 - \alpha_E \right) \right) E_{FD} + \left( 1 + \beta_n \right) \cdot E_{FP} \right]. \quad (38)$$

Der Vergleich mit Gl. (34) ohne Recycling zeigt, daß die Herstellenergie  $E_{FD}$  durch die Recyclingquote  $\alpha_{A,n}$  vermindert, durch den Recyclingaufwand  $\alpha_E$  aber wieder vergrößert wird. Für die Produktherstellung ist ein Mehraufwand  $\beta_n$  zu leisten.

Mit Gl. (33) für  $\alpha_E$  soll Gl. (38) für spätere Vergleiche nochmals anders geschrieben werden:

$$E_{R,n} = n \left[ \left( 1 - \alpha_{A,n} \right) \cdot E_{FD} + \alpha_{A,n} E_R + \left( 1 + \beta_n \right) \cdot E_{FP} \right]. \quad (39)$$

Die **Energiedifferenz** zwischen den beiden Fällen Gl. (34) und Gl. (35) beträgt:

$$\Delta E_{R,n} = E_{F,n} - E_{R,n} \quad \text{oder} \quad (40)$$

$$\Delta E_{R,n} = (n-1) \cdot \left[ \left( 1 - \alpha_E \right) \cdot \alpha_A \cdot E_{FD} - \beta \cdot E_{FP} \right]. \quad (41)$$

**Energie kann eingespart werden, solange  $\Delta E_{R,n}$  positiv bleibt.**

Die Einsparenergie wächst mit der Anzahl der Nutzungen  $n$ . Wichtig ist, daß  $\alpha_E$  möglichst klein bleibt, d. h. daß im Recyclingpfad im Vergleich zum Herstellpfad wenig Energie aufgewendet wird. Energetische Aufwendungen für die endgültige Abfallbeseitigung erhöhen den Vorteil des Recyclings.

Der Anteil des Rezyklats  $\alpha_A$  sollte möglichst nahe an 1 liegen.

Damit der Gewinn aus dem Recycling nicht durch erhöhte Produktions-Energieaufwendungen bei Verwendung von Rezyklat zu sehr geschmälert wird, sollte  $\beta$  klein bleiben.

Das ist am ehesten der Fall, wenn das Material nicht aufgelöst wird und die Recyclingenergie in diesem Fall klein bleibt im Vergleich zur Rohstoff- und Materialherstellenergie  $E_{FM}$ .

**Beispiel:** Es werde angenommen, daß der Energieaufwand für das Materialrecycling und für die Produktherstellung gleich groß seien.

$$E_R \approx E_{FP}.$$

Die Durchlaufenergie des Materials aus frischen Rohstoffen  $E_{FD}$  sei um einen Faktor 7 größer als die Materialrecyclingenergie.

$$E_{FD} = 7 E_R.$$

Schließlich betrage der Mehrverbrauch für die gemeinsame Verarbeitung von Rezyklat und Frischware

$$\beta = 15 \%.$$

Damit ergibt sich eine Energieeinsparung

$$\frac{\Delta E_R^n}{E_{FD}} = (n - 1) \left[ \left( 1 - \frac{1}{7} \right) \alpha_A - \frac{0,15}{7} \right] = (n - 1) \left[ 0,86 \alpha_A - 0,021 \right],$$

die im wesentlichen von Produkt aus Nutzungszahl  $(n - 1)$  und Rezyklatanteil  $\alpha_A$  abhängig ist.

Mit

$$n = 5$$

Nutzungen ergibt sich selbst bei einer kleinen Recyclingquote  $\alpha_A = 20 \%$  immerhin schon eine Einspardifferenz bzw. Einsparquote:

$$\frac{\Delta E_R^n}{E_{FD}} \left| \alpha_A = 20\% \right. = 0,6 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta E_R^n}{E_{FD} \cdot n} = 12\%$$

Bei einer hohen Recyclingquote  $\alpha_A = 80\%$  ergibt sich bereits:

$$\frac{\Delta E_R^n}{E_{FD}} \left| \alpha_A = 80\% \right. = 2,67 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta E_R^n}{E_{FD} \cdot n} = 53\%$$

Im effizienten Materialrecycling herstellerenergieintensiver Kunststoffe liegt auf den ersten Blick ein beträchtliches energetisches Einsparpotential.

### 3.4.2 Verbrennungsenergieverwertung

Bestehen die *Produkte aus brennbaren Stoffen* oder sind solche darin enthalten, so können die Produkte nach Gebrauch energetisch weiterverwertet werden, indem sie verbrannt werden und die entstehende Wärme in nachfolgenden Prozessen genutzt wird. In Sonderfällen kann hierbei eine Rückführung von weiteren stofflichen Komponenten des Produktes oder Materials denkbar werden (z. B.: HCl aus PVC).

- **Verbrennungsenergieverwertung** ist der Einsatz von Altstoffen / -produkten, Produktionsabfällen bzw. Hilfs- und Betriebsstoffen zur Energieerzeugung durch Verbrennung.

Es können zwei Fälle unterschieden werden:

- a) Strom und Wärme werden anderweitig verwendet und ersetzen sonst notwendige Primärenergie. Es ergibt sich ein Energiespareffekt.
- b) Strom und Wärme werden für den Verbrennungsprozeß selbst verwendet (Schlackebehandlung, Rauchgasreinigung). Würden die Produkte nicht verbrannt, so würde auch keine Energie für den Prozeß benötigt. Die Verbrennung ersetzt keine anderweitige Primärenergie sondern erfolgt zusätzlich.

Die mit der Verbrennung und ihren Rückständen einhergehenden Umweltbelastungen müssen gegenüber den Belastungen aus einer direkten Deponierung und anderweitiger Energieerzeugung verglichen und bewertet werden.

### 3.5 Recycling von Polymeren

**Recyclingbehandlungsprozesse** für Polymere zeigt Bild 6 (Hoechst, 1991).

Produkt- und Materialrecycling erfolgen mit **polymererhaltenden Verfahren**, wobei das Materialrecycling zu **Häckseln, Granulaten und Pulvern** führt. Der zur Herstellung des Polymers notwendige Energieaufwand wird damit beim wiederholten Verwenden des Stoffes eingespart, beim Produktrecycling zusätzlich der zur Formgebung notwendige Aufwand. Der Aufwand zur Auf- und Umarbeitung vermindert diese Ersparnis<sup>3)</sup>.

**Polymeraufspaltende Verfahren** führen zum Rohstoffrecycling, jedoch unter Verlust des zur Polymerherstellung aus den Rohstoffen notwendigen Energieaufwandes. Bei der Neuproduktion aus Sekundärrohstoffen muß dieser erneut aufgebracht werden. Der Aufwand zur Aufspaltung kommt noch hinzu.

Unter dem Begriff "Chemisches Recycling" sind folgende Möglichkeiten angegeben, worauf in einem späteren Kapitel eingegangen wird:

- Pyrolyse,
- Hydrierung,
- Hydrolyse,
- Alkoholyse,
- biochemische Methoden.

Unter dem Begriff "energetisches Recycling" wird die Verbrennung genannt.

#### 3.5.1 Primärenergiebedarf und Verbrennung bei Materialien

Für die Herstellung von **Materialien** werden **Rohstoffe** und **Energie** benötigt. Bei **Kunststoffen** wird als Rohstoff gewöhnlich **Erdöl** verwendet. Da Erdöl sich gut verbrennen läßt, kann daraus im Prinzip auch die für die Herstellung notwendige Energie (Prozeßwärme und elektrische Energie) gewonnen werden.

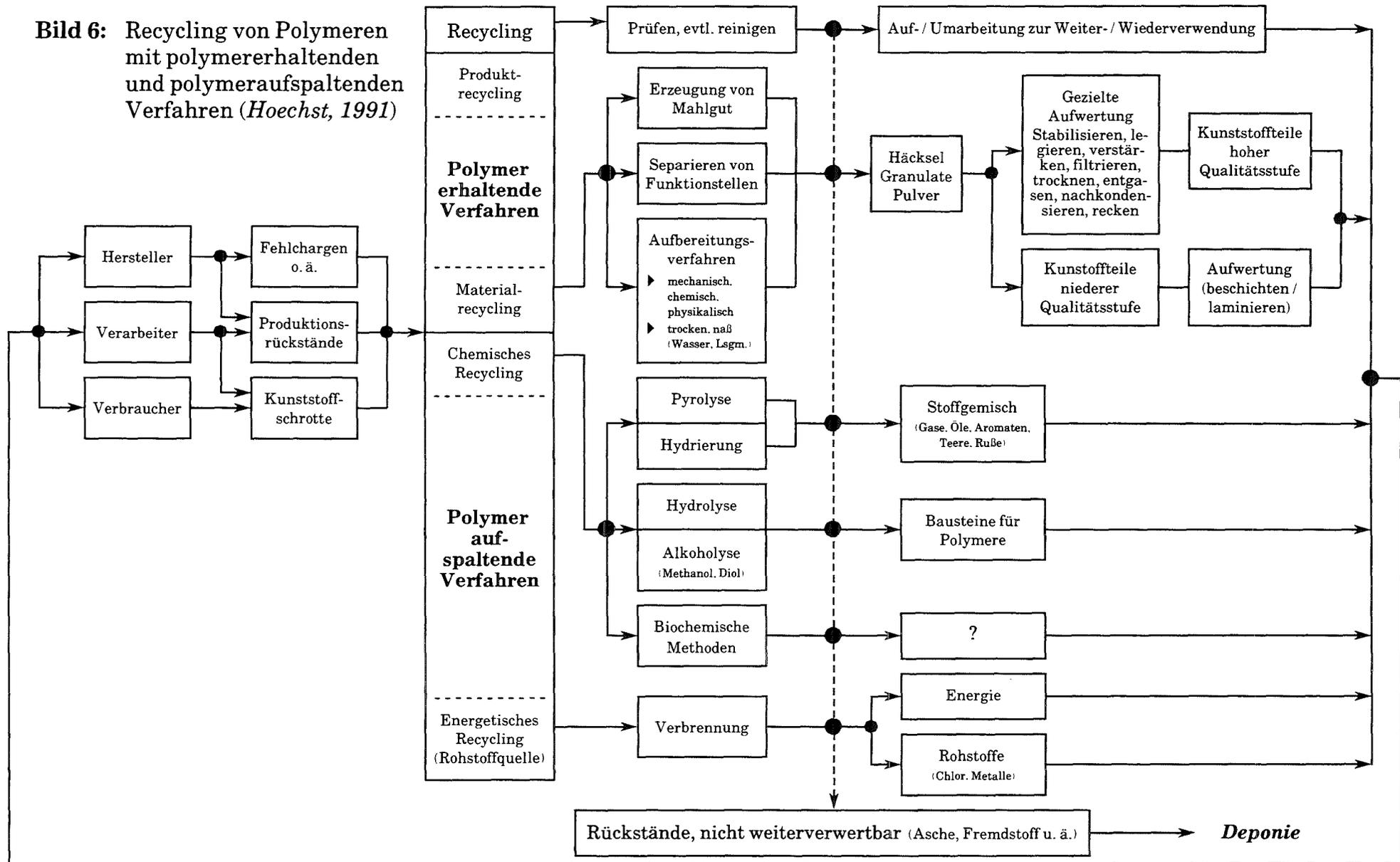
Die Entnahmemenge aus der Ölquelle kann man sich demnach aus einer Menge **A** als Materialrohstoff und einer Menge **B** zur Erzeugung der Herstellenergie zusammengesetzt denken:

Rohölentnahmemenge = Materialmenge **A** + Herstellenergiemenge **B**.

---

3) Weiterhin sind Umweltentlastungs- und Arbeitsplatzgesichtspunkte zu berücksichtigen.

**Bild 6:** Recycling von Polymeren mit polymererhaltenden und polymeraufspaltenden Verfahren (Hoechst, 1991)



Über den **Brennwert des Öls** können die Mengen in Energieäquivalente umgerechnet werden. Für Naphta gilt z. B.:

$$E_{Naphta} = \frac{43 \text{ MJ}}{\text{kg}}.$$

So kann die Rohölentnahmemenge äquivalent als Energieentnahme dargestellt werden.

*Kindler/Nikles (1979/1980)* haben für den **Rohstoffanteil des Erdöls** im Kunststoff ein **Energieäquivalent** in Form der **Verbrennungsenthalpie**  $E_F^V$  gewählt, die das **fertige Produkt** (Pulver, Granulat) hat. Diese addierten sie zu der tatsächlich benötigten **Herstellenergie**  $E_{FM}$  und nannten den gesamten Energie- und Rohstoffaufwand "**Energieäquivalenzwert**" mit der Einheit [MJ/kg Produkt]:

$$E_F^{PV} = E_F^V + E_{FM}. \quad (42)$$

Bis zum Ende der Kette muß noch für die Herstellung (und die Nutzung) der Produkte notwendige Energie  $E_{FP}$  sowie für die Beseitigung notwendige Energie  $E_{FB}$  hinzuaddiert werden. Der gesamte Primärenergiebedarf ist dann:

$$E_F^P = E_F^V + E_{FM} + E_{FP} + E_{FB}. \quad (43)$$

**Aus einer Öllagerstätte wird eine dem Primärenergiebedarf entsprechende Menge entnommen, wenn der Kunststoff nach Gebrauch auf der Deponie landet. Dieser Fall dient für die nachfolgenden Betrachtungen als Referenzfall.**

Die Verbrennungswärme  $E_{FV}^V$ , die der Kunststoff enthält, kann nach der Gebrauchsphase zu einem Teil durch Verbrennung genutzt werden. Es sei  $\alpha_{FV}$  der verbrannte Anteil an der gesamten zu entsorgenden Kunststoffmenge. Die gewonnene Verbrennungswärme  $E_V$  ist damit:

$$E_V = \alpha_{FV} \cdot E_F^V. \quad (44)$$

Jedoch kann nur der kohlenwasserstoffhaltige Anteil des Kunststoffs energetisch genutzt werden. Nichtbrennbare Anteile erfordern einen zusätzlichen energetischen Aufwand, der den Verbrennungsgewinn schmälert. Dieser Aufwand muß im Term: Beseitigungsenergie  $E_{FB}$  (Gl. 43) berücksichtigt werden.  $E_{FB}$  setzt sich

dann aus dem Aufwand  $E_Z$  für den verbrannten Mengenanteil  $\alpha_{FV}$  und dem Aufwand  $E_B$  für den nicht verbrannten Mengenanteil  $(1 - \alpha_{FV})$  zusammen:

$$E_{FB} = \alpha_{FV} \cdot E_Z + (1 - \alpha_{FV}) E_B \quad (45)$$

Der gesamte Primärenergiebedarf  $E^{PV}_F$  unter Einschluß von Verbrennung ist damit im Vergleich zu (Gl. 43):

$$E^{PV}_F = E_F^V - \alpha_{FV} \cdot E_F^V + \alpha_{FV} \cdot E_Z + E_{FM} + E_{FP} + (1 - \alpha_{FV}) E_B \quad (46)$$

oder:

$$E^{PV}_F = \left[ 1 - \alpha_{FV} \left( 1 - \frac{E_Z}{E_F^V} \right) \right] E_F^V + E_{FM} + E_{FP} + (1 - \alpha_{FV}) E_B \quad (47)$$

Für die Minderung des Verbrennungswärmegewinns durch Mehraufwendungen für die Konditionierung von Verbrennungsabfällen und die Rauchgasreinigung wird der Faktor  $\epsilon$  eingefügt:

$$\epsilon = 1 - \frac{E_Z}{E_F^V} \quad (48)$$

Die für den nicht in die Verbrennung gebrachten Anteil der zu entsorgenden Kunststoffmenge wird abkürzend geschrieben:

$$E^{nV}_{FB} = (1 - \alpha_{FV}) E_B$$

Der **Primärenergiebedarf** (Energieäquivalenzwert)  $E^{PV}_{F, n}$  für **n frische Produktionen** mit Recycling durch Verbrennung ist mit diesen Abkürzungen:

$$E^{PV}_{F, n} = n \left[ (1 - \alpha_{FV} \cdot \epsilon) E_F^V + E_{FM} + E_{FP} + E^{nV}_{FB} \right] \quad (49)$$

Als Vergleichsgröße wird der Primärenergiebedarf ohne Recycling (ohne Verbrennung) (Gl. 43) herangezogen, ebenfalls für **n frische Produktionen**. Mit  $E_{FB} = E_B$  ergibt sich eine Energiedifferenz durch Verbrennung von:

$$\Delta E_{V, n} = E^P_{F, n} - E^{PV}_{F, n} \quad (50)$$

bzw.:

$$\Delta E_{V,n} = \alpha_{FV} \left( \epsilon E_F^V + E_B \right) = \alpha_{FV} \left( E_F^V - E_Z + E_B \right). \quad (51)$$

Die Ölentnahme aus der Quelle kann um diesen Teil vermindert gedacht werden, weil anderweitig, z. B. bei der Herstellenergie, durch diese Nutzung Öl eingespart wird (Energiegutschrift) 4).

Um einen möglichst hohen Verbrennungsgewinn zu erzielen, ist eine möglichst geringe Zusatzenergie  $E_Z$  anzustreben, damit  $\epsilon$  möglichst nahe bei 1 bleibt. Wird  $\epsilon$  negativ, so kann der Fall eintreten, daß durch Verbrennung keine Energie gespart wird, wenn  $E_B$  klein ist.

Die Schadstoffbilanz der Kunststoffverbrennung ist hier mit der aus direkter Ölverbrennung in Kraftwerken und Deponierung der Kunststoffe zu vergleichen und zu bewerten (zur  $CO_2$ -Erzeugung siehe Abschnitt 3.5.7).

4) Die Formel soll schrittweise einsichtig gemacht werden:

**I. a)** Für die **erste Frischproduktion** setzt sich die Rohölentnahme aus den Mengen für Rohstoff und Energie zusammen:

$$\text{Entnahme 1} = \text{Rohstoff 1} + \text{Energie 1.}$$

**b)** Nach Gebrauch des Produktes wird ein Teil  $\alpha$  des Materials verbrannt. Es entsteht die verfügbare Energie:

$$\text{Verbrennung 1} = \alpha \cdot \epsilon \cdot \text{Rohstoff 1.}$$

**II.** In der **zweiten Frischproduktion** kann ein Teil der Herstellenergie durch die Verbrennungsenergie aus der ersten Frischproduktion ersetzt werden.

Dieser Teil der Herstellenergie muß dann nicht aus der Rohölquelle entnommen werden.

Da dieselbe Menge Kunststoff erzeugt wird, gilt:

$$\text{Rohstoff 2} = \text{Rohstoff 1}$$

$$\text{Energie 2} = \text{Energie 1.}$$

Für die zweite Frischproduktion wird die (verringerte) Entnahme 2 und die Energie aus der vorigen Verbrennung eingesetzt, um diese Menge zu erzeugen:

$$\text{Entnahme 2} + \text{Verbrennung 1} = \text{Rohstoff 1} + \text{Energie 1.}$$

Daraus ergibt sich:

$$\text{Entnahme 2} = \text{Rohstoff 1} + \text{Energie 1} - \text{Verbrennung 1}$$

$$\text{Entnahme 2} = (1 - \alpha \cdot \epsilon) \cdot \text{Rohstoff 1} + \text{Energie 1.}$$

**III.** Und so weiter für jede Frischproduktion, bis zur letzten.

Die Verbrennungsenergie der letzten Frischproduktion bleibt übrig.

Denkt man sich diese letzte Verbrennungsenergie zur Verminderung der ersten Herstellenergie benutzt, so ist gedanklich auch die Entnahme für die erste Frischproduktion um den durch Verbrennung gewonnenen Anteil verringerbar.

In Tabelle 2 sind für gängige Kunststoffe die Herstellenergie  $E_{FM}$  und die Verbrennungsenthalpien  $E^{V_F}$  zusammengestellt.

**Tabelle 2:** Herstellenergie  $E_{FM}$  und Verbrennungsenthalpie  $E^{V_F}$   
(Kindler / Nikles, 1980)

Kunststoff	$E_{FM}$ [MJ/kg]	$E^{V_F}$ [MJ/kg]
PE	26 – 29	43
PP	29	44
PS	40 – 42	40
ABS	47	37
PVC	35	18
PUR-Weichschaum	71	27

Es fällt ins Auge, daß zwischen den Massenkunststoffen PVC und PE ein beinahe umgekehrtes Verhältnis zwischen den beiden Energieanteilen  $E_{FM}/E^{V_F}$  herrscht, siehe Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Verhältnis von Frischmaterial-Herstellenergie zu Verbrennungsenthalpie

Kunststoff	$E_{FM}/E^{V_F}$
PE	0,6 – 0,67
PVC	1,94

Werden beide Kunststoffe deponiert, so ist der Ressourcenaufwand pro kg bei PE deutlich größer als bei PVC, trotz der bei PE niedrigeren Herstellenergie.

Das liegt am mehr als doppelt so hohen Heizwert (Ölanteil) von PE im Vergleich zu PVC. Und es ist dieser Heizwert, der auf die Deponie verbracht wird.

Beim Recycling werden, grob gesprochen, sowohl die Differenz aus Materialherstellenergie- und Recyclingenergie als auch der Materialaufwand (in Energieäquivalenten) in der Höhe der Recyclingquote eingespart. Das gilt für beide Kunststoffe in gleicher Weise.

Der energetische Verbrennungsgewinn ist bei PE doppelt so hoch wie bei PVC (weil PVC zu 57 % aus Chlor besteht). Jedoch kann das bei der PVC-Verbrennung entstehende HCl rezykliert werden. Ob die Differenz von HCl-Herstellenergie und HCl-Recyclingenergie zu einem energetischen Gewinn führen kann, wird in Abschnitt 4.3 untersucht.

### **3.5.2 Primärenergiebedarf und Recycling bei Materialien und Produkten**

Recyclingvorgänge und Energieäquivalenzwerte dürfen nicht getrennt von der Frischproduktion betrachtet werden, weil jeder Recyclingvorgang einen Anteil der Frischproduktion ersetzt.

#### ***n-fache Materialnutzung***

- Für die **Frischproduktion** gilt, daß das **Materialrecycling im Energieäquivalenzwert für Materialien nicht enthalten** ist <sup>5)</sup>.
- Für das **Recycling** gilt, daß die **Voraufwendungen** für die Materialherstellung **nicht mehr aufgebracht** werden müssen, dafür **aber die Aufwendungen für das Recycling**.
- Die Summe aus **Frischproduktion und (n – 1)-fachem Recycling** ist nun mit **n-facher Frischproduktion** in gleicher Menge zu vergleichen. Beim Recycling werden die **Voraufwendungen und Gutschriften gleichmäßig auf n Produktionen umgelegt**<sup>6)</sup>.

#### ***m-fache Produktnutzung***

- Werden Produkte **m-fach** genutzt, so wird der Aufwand aus der Material- und Produktherstellung entsprechend umgelegt. Hinzu kommt der **zusätzliche Aufwand** für das Recycling der Produkte im Vergleich zur Frischproduktnutzung (einsammeln, säubern, reparieren etc.).

---

5) Kindler / Nikles (1980) formulieren noch zu ungenau: "**Die Wiederverwertung von Materialien nach Gebrauch des Fertigteils wird beim Energieäquivalenzwert des Werkstoffs grundsätzlich nicht berücksichtigt**". Wenn die Aussage nicht falsch sein soll, muß sie ausschließlich auf die Frischproduktion bezogen werden und deren Deponierung vorgesehen sein.

6) Dagegen Kindler / Nikles (1980): **Beim Recycling "ist das zurückgeführte Produkt mit dem Energieäquivalenzwert Null einzusetzen und mit allen Aufwendungen für die Rückführung zu belasten. Der regenerierte Werkstoff hat also einen anderen Energieäquivalenzwert, als der ursprüngliche"**.

Und daraus ergibt sich dann ein **Energieäquivalenzwert für einen bestimmten Kunststoff, der das Recycling berücksichtigt** 7).

Auch jetzt ist es möglich, den Energieäquivalenzwert zu benutzen, aber es muß vor dem Vergleich verschiedener Äquivalenzwerte der Lebensweg der Materialien beschrieben werden: **Die Energieäquivalenzwerte sind, je nach Lebensweg, bei denselben Materialien unterschiedlich.**

### 3.5.3 Materialrecycling (Wieder- oder Weiterverwertung)

Für die Produktion von Frisch- und Recyclingware werden folgende Annahmen getroffen:

Der Anteil von Recyclingmaterial an der Neuproduktion beträgt  $\alpha_A$ . Der Anteil der Frischproduktion demnach  $(1 - \alpha_A)$ .

Vom nicht auf der Materialebene rezyklierten Teil des Kunststoffs soll ein gewisser Anteil  $\alpha_{RV}$  verbrannt werden.

Nach Ende der Nutzung werde ein Anteil  $\alpha_{FV}$  wie bei der Frischproduktion verbrannt.

Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} E_{R,n}^{PV} &= E_{FM} + E_{FP} + \left(1 - \alpha_{FV} \cdot \epsilon\right) \cdot E_F^V + \left(1 - \alpha_{FV}\right) E_B \\ &+ (n - 1) \left[ E_{FM} + \left(1 - \alpha_{RV} \cdot \epsilon\right) E_F^V + \left(1 - \alpha_{FV}\right) E_B \right] \left(1 - \alpha_A\right) \\ &+ (n - 1) \left[ (1 + \beta) E_{FP} + E_R \right] \alpha_A \end{aligned} \quad (52)$$

Da beim Recyclingprozeß Frischware und Recyclingware kaum getrennt voneinander entsorgt werden, wird  $\alpha_{RV} = \alpha_{FV}$  angenommen.

Die Durchlaufenergie ist im Vergleich zu Gl. (32) beim Recyclingterm um den verbrannten Anteil vermindert und wird geschrieben als:

$$E_{FD}^V = E_{FM} + \left(1 - \alpha_{RV}\right) E_B \quad (53)$$

---

7) Dies haben *Kindler / Nikles* nicht behandelt.

Die Gl. (52) vereinfacht sich damit zu:

$$\begin{aligned} E_{R,n}^{PV} = & n \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \alpha_A \right) \cdot \left( E_{FD}^V + \left( 1 - \alpha_{RV} \cdot \varepsilon \right) E_F^V \right) \\ & + n \cdot \left( \frac{n-1}{n} \cdot \alpha_A \cdot E_R + \left( 1 + \frac{n-1}{n} \cdot \beta \right) E_{FP} \right). \end{aligned} \quad (54)$$

Mit den Abkürzungen für die effektive Recyclingquote  $\alpha_{A,n}$ , Gl. (23), den effektiven Mehraufwand  $\beta_n$ , Gl. (37) wird die Gleichung für den Energieäquivalenzwert, Gl. (35), anders geschrieben:

$$E_{R,n}^{PV} = n \cdot \left[ \left( 1 - \alpha_{A,n} \right) \cdot \left( E_{FD}^V + \left( 1 - \alpha_{RV} \cdot \varepsilon \right) \cdot E_F^V \right) + \alpha_{A,n} \cdot E_R + \left( 1 + \beta_n \right) \cdot E_{FP} \right]. \quad (55)$$

**Bei Berücksichtigung von Recycling auf der Materialebene (Wieder- und Weiterverwertung) sowie von Verbrennung (Öl-Ressourcenschonung und Deponieentlastung), ist der Energieäquivalenzwert vom "Lebenszenario" des Stoffes abhängig, d. h. von den Quoten, die rezykliert und verbrannt werden, sowie von der Anzahl der möglichen Materialnutzungen.**

Verbrannt werden kann nur der nicht-rezyklierte Anteil. Je mehr rezykliert wird, desto weniger kann / muß verbrannt werden.

Die Verbrennungsenthalpie wird entsprechend der Recyclingquote  $\alpha_A$  um

$$\left( 1 - (n-1) / n \cdot \alpha_A \right)$$

verringert und für  $E_{FD} > E_R$  wird nochmals Energie eingespart, wenn  $\beta$  nicht zu groß wird.

**Für das Materialrecycling können vier Szenarien unterschieden werden, für die unterschiedliche Energieäquivalenzwerte gelten:**

- a) *ohne Recycling (oR)* und *ohne Verbrennung (oV)*
- b) *mit Recycling (mR)* und *ohne Verbrennung (oV)*
- c) *ohne Recycling (oR)* und *mit Verbrennung (mV)*
- d) *mit Recycling (mR)* und *mit Verbrennung (mV)*.

### 3.5.4 Produkt- und Materialrecycling

Die  $m$ -fache Nutzung des Produktes erfordert einen Nutzungsaufwand  $E_{NP}$  (z. B.: Befüllen einer Flasche, Verteilen bzw. Besorgen, Unterhalten etc.), der für die nachfolgenden Recyclingvorgänge (auch zeitabhängig) anders sein kann, als für die Nutzung von Frischware.

Der Mehraufwand wird durch einen Faktor  $\gamma$  berücksichtigt. Der Nutzungsaufwand für  $m$ -Nutzungen ist dann:

$$E_{NP, m} = m \left[ 1 + \frac{m-1}{m} \gamma \right] E_{NP}. \quad (56)$$

Es wird ein "effektiver Mehrnutzungsfaktor"  $\gamma_m$  definiert:

$$\gamma_m = \frac{m-1}{m} \gamma. \quad (57)$$

Der Energieäquivalenzwert für  $N = m \cdot n$  Nutzungen eines Produkts ist:

$$E_{R, N}^{PV} = N \cdot \left[ \frac{1}{N} \cdot E_{R, n}^{PV} + \left( 1 + \gamma_m \right) E_{NP} \right]. \quad (58)$$

Der Materialaufwand  $E_{R, n}^{PV}$  wird auf die  $m \cdot n$  Nutzungen umgelegt. Je öfter das Produkt genutzt wird, desto kleiner ist der Materialaufwand je Nutzung.

### 3.5.5 Die Recycling-Illusion

Häufig wird ein zu einfaches Bild vom Recycling herstellintensiver Produkte gezeichnet, das man mit "hoffnungsfrohem Denkkurzschluß" bezeichnen könnte<sup>8)</sup>. Der Denkkurzschluß soll am *Beispiel eines fiktiven Kunststoffes* verdeutlicht werden:

Die frische Materialherstellung erfordert 35 MJ/kg Herstellenergie und 18 MJ/kg Energieäquivalente in Form von später verbrennbarem Material. Der gesamte Primärenergieaufwand für frisches Material ist (im Mittel) 53 MJ/kg (ohne Beseitigung)<sup>9)</sup>.

---

8) Davon waren auch die Autoren nicht ganz frei.

9) Die angeführten Werte sind die von PVC ohne Berücksichtigung des nicht brennbaren Chlorteils. Gegenüber anderen Kunststoffen bringt die Beseitigung von PVC besondere Probleme mit

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Der Energieaufwand für das Materialrecycling beträgt 5 MJ/kg (3 – 15 MJ/kg). Der "**hoffnungsvolle Kurzschluß**" besteht nun darin, optimistische Lösungen zu erzeugen!

1. Primärenergieaufwand: 53 MJ/kg,
2. Recyclingaufwand nur noch  $5 / 53 = 9,4 \%$  des ursprünglichen Aufwandes.

*Schlußfolgerung:* Über **90 %** der für frische Materialproduktion aufgewendeten Energie können **eingespart** werden.

Dabei wird stillschweigend und unbewußt vorausgesetzt, daß 100 % des eingesetzten Materials wieder zu exakt denselben Produkten verarbeitet werden (können). Das ist die eigentliche Illusion.

Und es wird stillschweigend und unüberlegt vorausgesetzt, daß das Material beliebig oft in gleicher Qualität rezykliert werden kann. Das ist gewöhnlich Unkenntnis in bezug auf Materialverhalten (und insoweit verzeihlich).

Mit wenigen Überlegungen wird der hoffnungsvoll große Recyclinggewinn bereits geschmälert.

Den Nutzer interessiert das Produkt und erst in zweiter Linie der Herstellweg. Für die Produktherstellung aus dem Material müssen 5 MJ/kg Herstellenergie aufgewendet werden, egal ob mit oder ohne rezykliertem Material. Für Produkte aus frischproduziertem Material bedeutet dies 58 MJ/kg und aus rezykliertem Material 10 MJ/kg. **Vom Nutzerstandpunkt** aus ist der "ideale" Recyclinggewinn bereits geringer:  $(1 - 10 / 58) = 83 \%$ .

Berücksichtigt man, daß nicht das gesamte Material wiedergewonnen werden kann, daß insbesondere bei Kunststoffen das rezyklierte Material keine ausreichend guten Farb- und Oberflächeneigenschaften hat und deshalb stets frisches Material zugesetzt werden muß, dann reduziert sich der denkbare Recyclinggewinn schnell. Es werden dazu die folgenden Fallunterscheidungen gemacht:

---

(Fortsetzung von der Vorseite)

sich, wenn Verbrennung in Betracht gezogen wird. Durch den Chloranteil und die Chlorwasserstofferzeugung bei der Verbrennung muß ein Neutralisationsmittel eingesetzt werden, für das Energie und Stoffaufwendungen einzusetzen sind (vgl. Abschnitt "Ressourcenstreckung und Deponieschonung").

● **Materialrecycling oder Verbrennung bei 84 % und 36 % Restabfall**

Zum Vergleich mit den Recyclingwerten  $\alpha_A = 20\%$  ( $\alpha_{A,n} = 16\%$ ) und  $\alpha_A = 80\%$  ( $\alpha_{A,n} = 64\%$ ) werden für die Verbrennung äquivalente Quoten  $\alpha_{RV} = 16\%$  und ein extremer Wert von  $\alpha_{RV} = 64\%$  zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse für die gewählten Beispiele sind in **Tabelle 4** wiedergegeben. Die Energieäquivalenzwerte werden auf  $n \cdot E_{FM}$  (mit  $n = 5$ ) bezogen. Sie variieren für den gleichen Stoff von 23 bis 58 MJ/kg je nach Szenario.

Ein Recyclingpfad mit geringer Materialrecyclingquote  $\alpha_A = 20\%$  (ohne Verbrennung) führt zu einer Einsparung von 12 % gegenüber einer Verbrennungseinsparung von nur 5 % bei  $\alpha_{RV} = 16\%$  (ohne Materialrecycling).

Ein hoher Verbrennungspfad mit  $\alpha_{RV} = 64\%$  (ohne Materialrecycling) würde nur 20 % Einsparung liefern.

Würde das Materialrecycling forciert, so ließen sich bei extremem  $\alpha_A = 80\%$  (ohne Verbrennung) 52 % der eingesetzten Ölressource sparen.

Das wäre immer noch optimistisch, bedeutet aber "nur" einen Faktor 2 bei der Streckung der Öl-Ressourcen. Darin liegt die Ent-Täuschung! Jedoch zeigt sich auch: **Materialrecycling kann bei dem gewählten Beispiel zu deutlich höheren Energieeinsparungen führen, als die Verbrennung.**

***Beim Materialrecycling reduziert sich der ideale Recyclinggewinn von 90 % für Massenkunststoffe unter absehbar realistischen Bedingungen auf 10 – 15 % der eingesetzten Primärenergie.***

● **Materialrecycling und Verbrennung mit 10 % Restabfall**

Durch Materialrecycling und Verbrennung sollen 90 % der Abfälle "beseitigt" werden, 10 % verbleiben von vornherein für die Deponie. Für den Fall  $\alpha_A = 0,2$  bedeutet dies für die verbleibende Differenz eine Verbrennungsquote  $\alpha_{RV} = 0,88$  und für  $\alpha_A = 0,8$  ergibt sich  $\alpha_{RV} = 0,72$ .

Bei gleicher Materialrecyclingquote führt die zusätzliche Verbrennung bei  $\alpha_A = 0,2$  zu einem Anstieg der Einsparquote von 12 % (ohne Verbrennung, 84 % Restabfallmenge) auf 35 % (10 % Restabfallmenge) und bei  $\alpha_A = 0,8$  von 52 % (ohne Verbrennung, 36 % Restabfall) auf 60 % (10 % Restabfallmenge).

Die Kombination von Materialrecycling und Verbrennung führt (wie zuvor!) nur bei hohen Quoten für das Materialrecycling zu einer nennenswerten Ressourcenstreckung. Hingegen ist die Deponieentlastung bei 10 % Restabfall entsprechend ein Faktor 10.

Dieser hohe Wert ist in der Praxis wegen zusätzlicher Einsatzstoffe in der Rauchgasreinigung und Filterstäuben sowie Verbrennungsschlacken nicht erreichbar. Jedoch kann sich zusätzlich eine Verschiebung der Reste von der Hausmülldeponie in die Sondermülldeponie und in Bauprodukte ergeben.

**Fazit:**

*Bei 10 % Restabfall führen große Anstrengungen für das Materialrecycling und zusätzliche Verbrennung zu (bestenfalls) 60 % Energieeinsparung. Ausschließliche Verbrennung führt zu deutlich geringeren Energieeinsparungen.*

### 3.5.6 Ressourcenstreckung und Deponieschonung

Die Energieäquivalenzwerte sind ein Maß für die Rohstoffentnahmemenge aus der Rohölquelle.

Durch Recycling und Verbrennung kann die Entnahmemenge durch Energieeinsparung und Energiegutschriften reduziert werden.

Die **Ressourcenstreckung** ergibt sich analog aus dem Verhältnis der Primärenergieaufwendungen ohne und mit Recycling bei  $N$  Nutzungen, Gl. (49) sowie Gl. (55), mit  $\alpha_{FV} = 0$ ,  $n = N$  und Berücksichtigung der Nutzungsenergie in  $E_{FP}$ :

$$S_{EP} = \frac{E_{F, n}^{PV} (n = N, oV)}{E_{R, N}^{PV}} \quad (59)$$

Die frischproduzierte und nach Gebrauch nicht verbrannte Menge landet auf der Deponie. Je höher der Recyclinggrad ist und je größer der verbrannte Anteil der Restmenge, desto geringer ist die Deponiebelastung.

Die Werte in Tabelle 4 lassen sich wie folgt interpretieren: Hohe Materialrecyclingquoten führen zu größerer Schonung der Öl-Ressource als gleiche Verbrennungsquoten. Bei 36 % verbleibenden Reststoffen für die Deponie beträgt der Streckungsfaktor beim Materialrecycling 2,1 und bei der Verbrennung 1,3.

Wenn das Material rezykliert und zusätzlich Reststoffe verbrannt werden, so führt eine gesteigerte Verwertungsquote mit nur 10 % Resten für die Deponie nur dann zum höheren Streckungsfaktor, wenn das Materialrecycling intensiv betrieben wird. Bei  $\alpha_A = 0,8$  und  $\alpha_{RV} = 0,72$  führt dies zu einem Faktor 2,5.

Andererseits enthalten manche Stoffe auch nicht brennbare Anteile  $f_{nb}$ , die nach der Verbrennung als Schlacke bzw. Filterstäube auf Deponien kommen. Für die Rauchgasreinigung und evtl. Neutralisation müssen zusätzliche Stoffe eingesetzt werden, die die Deponieentlastung durch Verbrennung wieder verringern. Der Anteil dieser zusätzlichen Stoffe bezogen auf die zu verbrennende Substanz sei  $f_z$ , so daß sich insgesamt ergibt:

$$f = f_{nb} + f_z \quad (60)$$

Die **Deponiestreckung** ergibt sich analog zu Gl. (28) aus dem Verhältnis von frisch produzierter Menge ohne Recycling und ohne Verbrennung, zu dem auf die Deponie verbrachten Anteil der frisch produzierten Menge mit Verbrennung und Recycling und Berücksichtigung der Verbrennungsreststoffe sowie zusätzlicher Einsatzstoffe:

$$S_D = \frac{m}{\left(1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A\right) \left(1 - \alpha_{RV} \cdot (1-f)\right)} \quad (61)$$

**Durch die Möglichkeit, Material über die Verbrennung als CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre zu "deponieren", unterscheidet sich qualitativ die Deponiestreckung von der Ressourcenstreckung, Gl. (28) und Gl. (59).**

Gl. (61) zeigt, daß die Deponiestreckung vom Produkt aus dem frischproduzierten Anteil  $(1 - \alpha_A, n)$  und dem verbrannten Anteil  $[1 - \alpha_{RV}(1 - f)]$  abhängt. Es ist deshalb zu untersuchen, auf welchem Weg die Deponieentlastung am besten zu erreichen ist. Beim Materialrecycling wird die Einsammelquote durch die begrenzte Nutzungszahl und durch Reste im Recyclingpfad effektiv vermindert und die Deponie dadurch nicht so stark entlastet wie es der Einsammelquote entsprechen würde. Bei der Verbrennung wird die Verbrennungsquote durch Zusatzstoffe zur Rauchgasreinigung und Konditionierung der Verbrennungsreste (sowie bei PVC zur Neutralisation von HCl) ebenfalls effektiv vermindert.

Die Deponiestreckung ist umgekehrt proportional zur verbleibenden Reststoffmenge. Die Werte für die Deponiestreckung zu den gewählten Beispielen,

Tabelle 4, sind mit  $f = 0$  berechnet worden. Sie sind hier idealisiert und damit zu hoch, weil die effektiven Minderungen der Recycling- und Verbrennungsquoten nur bei der Nutzungszahl  $n$  berücksichtigt sind.

Beim **Produktrecycling** führen bereits wenige Wiedernutzungen ( $m > 1$ ) zu erheblich größeren Streckungsfaktoren, da der Streckungsfaktor linear mit der Anzahl der Wiedernutzungen ansteigt.

### 3.5.7 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Erzeugung

Die Herstell- und die Beseitigungsenergie ist gleichzeitig auch CO<sub>2</sub>-äquivalente Energie. Die zugehörige Rohstoffmenge gelangt nicht auf die Deponie, sondern überwiegend über Verbrennungsprozesse als CO<sub>2</sub> in die Luft. Lediglich die frisch produzierte und nach Gebrauch nicht verbrannte Rohstoffmenge, die zur Materialherstellung verwendet wurde, gelangt auf die Deponie.

**Ideale Verbrennung** der frischen Menge nach Gebrauch (als tatsächlicher Ersatz für sonst eingesetzten Rohstoff, nicht als Prozeßenergie im Verbrennungsverfahren selbst!) wäre **CO<sub>2</sub>-neutral**. Sie würde die ansonsten im gleichen Umfang erzeugte CO<sub>2</sub>-Menge ersetzen. Verbrennungsenergie, die als Prozeßenergie des Verbrennungsvorgangs selbst gebraucht wird, belastet die CO<sub>2</sub>-Bilanz zusätzlich. Das heißt: **Durch Verbrennen läßt sich zwar die Ressource strecken, nicht aber der effektive CO<sub>2</sub>-Ausstoß vermindern.**

**Durch Einsparen von Herstellenergie im Recyclingpfad lassen sich CO<sub>2</sub>-Äquivalente einsparen.** Das kann durch einen Minderungsfaktor  $\delta_{CO_2}$  aus der Energiedifferenz von Frischware und Recyclingware Gl. (41), bezogen auf den Energieaufwand für Frischware Gl. (34) ausgedrückt werden.

$$\delta_{CO_2} = \frac{\Delta E_{R,n}}{E_{F,n}} \quad (62)$$

Bei  $\alpha_A = 0,2$  sind das etwa 11 % bzw. 46 % bei  $\alpha_A = 0,8$  (für den Fall  $m = 1$  Materialrecycling), vgl. Tabelle 4.

Mehrfachnutzung von Kunststoffprodukten könnte ein bedeutender Beitrag zum Ressourcen- und Umweltschutz sein. Jedoch gibt es sehr viele Kunststoffprodukte, die dazu nicht geeignet oder dafür gar nicht vorgesehen sind.

**Tabelle 4:** Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und CO<sub>2</sub>-Minderung bei einem fiktiven Kunststoff (ohne feste Verbrennungsrückstände und ohne Beseitigungsenergie  $E_{FB}$ )

$\beta = 0,15$ $n = 5$ $\alpha_E = 0,14$ $f = 0$ $\epsilon = 1$	Wichtung	ohne Verbrennung, ohne Recycling	mit Recycling, ohne Verbrennung 84 % (Rest) 36 %		mit Verbrennung, ohne Recycling 84 % (Rest) 36 %		mit Verbrennung, mit Recycling (10 % Restabfall)	
			$\alpha_{A, n=0,16}$ ( $\alpha_A = 0,2$ )	$\alpha_{A, n=0,64}$ ( $\alpha_A = 0,8$ )	$\alpha_{RV} = 0,16$	$\alpha_{RV} = 0,64$	$\alpha_{RV} = 0,88$ $\alpha_A = 0,2$	$\alpha_{RV} = 0,72$ $\alpha_A = 0,8$
$E_{FM} : \left( 1 - \frac{n-1}{n} (1 - \alpha_E) \alpha_A \right)$	1	1	0,86	0,45	1	1	0,86	0,45
$E_{FP} : \left( 1 + \frac{n-1}{n} \beta \right)$	0,14	0,14	0,16	0,16	0,14	0,14	0,16	0,16
$E_F^V : \left( 1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A \right) (1 - \alpha_{RV} \cdot \epsilon)$	0,51	0,51	0,43	0,18	0,43	0,18	0,05	0,05
$\Sigma$ Energieaufwendungen normiert auf $[n \cdot E_{FM}]$		1,65	1,45	0,79	1,57	1,32	1,07	0,66
Einsparung in % bezogen auf "ohne Verbrennung, ohne Recycling"			12 %	52 %	5 %	20 %	35 %	60 %
Energieäquivalenzwert zur Produktherstellung [MJ/kg] ( $E_{FM} = 35$ MJ/kg)		58	51	28	55	46	38	23
Ressourcenstreckung: $S_E$			1,1	2,1	1,1	1,3	1,5	2,5
Deponiestreckung: $S_D$			1,2	2,8	1,2	2,8	10	10
CO <sub>2</sub> - Minderung (-) - Vermehrung (+)	absolut, normiert auf $[n \cdot E_{FM}]$ : in Prozent :		- 0,12 - 11 %	- 0,53 - 46 %	(0) (0)	(0) (0)	- 0,12 - 11 %	- 0,53 - 46 %

### 3.5.8 Vergleich PVC und PE

PVC und PE werden unter den gleichen Verwertungsbedingungen für das **Materialrecycling** wie oben behandelt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5** enthalten <sup>10)</sup>.

Die prozentuale Energieeinsparung ist in beiden Fällen etwa gleich mit 12 % bei PVC und 13 % bei PE für  $\alpha_A = 0,2$  sowie 52 % bei PVC und 55 % bei PE für  $\alpha_A = 0,8$ . Der Energieäquivalenzwert von PVC bleibt deshalb in den beiden betrachteten Fällen mit 51 MJ/kg bzw. 28 MJ/kg kleiner, als der von PE mit 65 MJ/kg bzw. 34 MJ/kg. Hingegen macht sich beim Verbrennen die Tatsache bemerkbar, daß PVC (grob gesprochen) nur zur Hälfte aus Kohlenwasserstoffen besteht und im allgemeinen auch nicht brennbare Zusatzstoffe (z. B. Kreide) enthält. Für PVC wird ein Faktor  $\epsilon = 0,6$  und für PE  $\epsilon = 0,95$  angenommen. Der **Verbrennungsgewinn** beträgt mit diesen Werten nur **3 % bei PVC** und **9 % bei PE** für  $\alpha_{RV} = 0,16$  bzw. **12 % bei PVC** und **34 % bei PE** für  $\alpha_{RV} = 0,64$ . Die Energieäquivalenzwerte sind bei  $\alpha_{RV} = 0,16$  bei PVC 56 MJ/kg und bei PE 68 MJ/kg. Bei  $\alpha_{RV} = 0,64$  ergibt sich für PE mit 50 MJ/kg ein Wert, der kleiner ist als der von PVC mit 51 MJ/kg.

Die **Kombination Materialrecycling und Verbrennung** der verbleibenden Reste verringert den benötigten Energieäquivalenzwert für PVC und PE in unterschiedlicher Weise. Für ein Szenario mit 10 % verbleibenden Reststoffen, die nicht verbrannt, sondern deponiert werden, ergibt sich:

Bei kleiner Materialrecyclingquote  $\alpha_A = 0,2$  bringt zusätzliche Verbrennung den Energieäquivalenzwert von PE mit 35 MJ/kg auf eine Größe wie bei der hohen Materialrecyclingquote ( $\alpha_A = 0,8$ ). Der Wert für PVC sinkt hingegen weitaus weniger ab, von 51 MJ/kg auf 43 MJ/kg bei  $\alpha_A = 0,2$ .

Bei hohen Materialrecyclingquoten  $\alpha_A = 0,8$  hingegen holt PVC wieder auf. Jedoch **lohnt sich die Verbrennung nur für PE** (PVC von 28 MJ/kg auf 25 MJ/kg und PE von 34 MJ/kg auf 23 MJ/kg bei  $\alpha_A = 0,8$ ).

Die **Ressourcenstreckung** erreicht bei PVC maximal einen **Faktor 2,3** und bei PE durch die Verbrennung einen größeren **Faktor 3,3**. Dies sind zwar keine unerheblichen Faktoren, aber das Ende der Ressource bleibt absehbar.

---

<sup>10)</sup> In einer späteren Arbeit soll der Vergleich auch konstruktionsspezifische Parameter, sowie Umweltparameter für spezielle Produkte miteinbeziehen.

Durch die notwendigen Zusatzstoffe der HCl-Neutralisation und den hohen Reststoffanteil des PVC bringt die Verbrennung auch nicht die hohe **Deponieentlastung** wie erhofft.

Hier liegt **PE** weitaus günstiger mit einem **Faktor 10** gegenüber **3,6** bei **PVC** im Szenario "10 % nicht verwertete Reste und hohe Materialrecyclingquote  $\alpha_A = 0,8$ ".

Verbrennung belastet die Atmosphäre dann zusätzlich mit  $\text{CO}_2$ , wenn die Verbrennungsenergie als zusätzliche Prozeßenergie (verglichen mit reiner Öl-Verbrennung) benötigt wird.

Dies wird besonders deutlich im **Szenario "mit Verbrennung, ohne Recycling"**, wo im hohen Verwertungspfad eine **Steigerung der  $\text{CO}_2$ -Erzeugung von 6 % bei PE und 15 % bei PVC** verglichen mit reiner Deponie erfolgt.

Demgegenüber **sinkt die  $\text{CO}_2$ -Erzeugung bei hoher Materialrecyclingquote  $\alpha_A = 0,8$  um über 40 % für beide Kunststoffe.**

**Energieeinsparung mit  $\text{CO}_2$ -Minderung kann nennenswert nur durch Materialrecycling mit möglichst hohen Quoten erreicht werden.**

**Tabelle 5:** Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und CO<sub>2</sub>-Minderung bei PVC und PE

$\beta = 0,15$ $n = 5$	PVC PE	PE PVC	Wichtung	ohne Verbrennung, ohne Recycling		ohne Verbrennung, mit Recycling 84 % (Rest) 36 %		mit Verbrennung, ohne Recycling 84 % (Rest) 36 %		mit Verbrennung, mit Recycling (10 % direkt deponiert)	
				PVC PE	PVC PE	$\alpha_A = 0,2$	$\alpha_A = 0,8$	$\alpha_{RV} = 0,16$ $\epsilon = 0,6$ $\epsilon = 0,95$	$\alpha_{RV} = 0,64$ $\epsilon = 0,6$ $\epsilon = 0,95$	$\alpha_{RV} = 0,88$ $\alpha_A = 0,2$ $\epsilon = 0,6/0,95$	$\alpha_{RV} = 0,72$ $\alpha_A = 0,8$ $\epsilon = 0,6/0,95$
$E_{FM}$ $E_{FP}$ $E_{FV}$ $\alpha_E$ $f$	35 5 18 0,14 0,7	27 5 43 0,19 0									
$E_{FM} \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \left( 1 - \alpha_E \right) \alpha_A \right)$	1 1	1 1			0,86 0,87	0,45 0,48	1 1	1 1	0,86 0,87	0,45 0,48	
$E_{FP} \cdot \left( 1 + \frac{n-1}{n} \beta \right)$	0,14 0,19	0,14 0,19			0,16 0,21	0,16 0,21	0,14 0,19	0,14 0,19	0,16 0,21	0,16 0,21	
$E_{FV} \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A \right) \left( 1 - \alpha_{RV} \cdot \epsilon \right)$	0,51 1,59	0,51 1,59			0,43 1,34	0,18 0,57	0,46 1,56	0,32 0,64	0,2 0,21	0,1 0,18	
$\Sigma$ Energieaufwendungen normiert auf $[n \cdot E_{FM}]$					1,65 2,78	1,45 2,42	0,79 1,26	1,6 2,54	1,46 1,83	1,22 1,29	0,71 0,87
Einsparung in % bezogen auf "ohne Verbrennung, ohne Recycling"					12 % 13 %	52 % 55 %	3 % 9 %	12 % 34 %	26 % 54 %	57 % 69 %	
Energieäquivalenzwert [MJ/kg] zur Produktherstellung und Beseitigung					58 75	51 65	28 34	56 68	51 50	43 35	25 23
Ressourcenstreckung: $S_E$					1,1 1,2	2,1 2,2	1,0 1,1	1,1 1,5	1,3 2,1	2,3 3,3	
Deponiestreckung: $S_D$					1,2 1,2	2,8 2,8	1,1 1,2	1,2 2,8	1,6 10	3,6 10	
CO <sub>2</sub> - Minderung (-) - Vermehrung (+)				absolut, normiert auf $[n \cdot E_{FM}]$ : in Prozent :	-0,12/-0,11 -11 %/-9 %	-0,53/-0,5 -46 %/-42 %	0,3/0,01 3 %/1 %	0,17/0,07 15 %/6 %	+0,03/-0,05 +3 %/-4 %	-0,48/-0,48 -42 %/-40 %	

### 3.6 Energieaufwand und Recycling bei Kunststoffen (Zusammenstellung der Gleichungen)

Die zuvor abgeleiteten Beziehungen zum Stoffumsatz bei frischer und Recyclingproduktion, sowie die Gleichungen der damit verbundenen Primärenergieaufwendungen werden im folgenden zusammengefaßt wiedergegeben.

---

Gesamtnutzungszahl  $N$  aus Produktnutzungszahl  $m$   
und Materialnutzungszahl  $n$

$$N = m \cdot n \quad (6)$$

Effektive Recyclingquote

$$\alpha_{A, n} = \frac{n-1}{n} \alpha_A \quad (23)$$

Effektiver Mehrproduktionsaufwandsfaktor

$$\beta_n = \frac{n-1}{n} \beta \quad (37)$$

Effektiver Mehrnutzungsaufwandsfaktor

$$\gamma_m = \frac{m-1}{m} \gamma \quad (57)$$

Stoffmenge für  $N = m \cdot n$  frische Produktionen

$$M_F = N \cdot m_F \quad (2)$$

Stoffmenge für  $n$  Produktionen mit Recycling  
und  $m$  Produktnutzungen

$$M_F^R = N \cdot m_F \cdot \frac{1}{m} \left( 1 - \alpha_{A, n} \right) \quad (22)$$

Ressourcenstreckung bei Stoffen ohne Verbrennung

$$S_R = \frac{m}{\left( 1 - \alpha_{A, n} \right)} \quad (28 \text{ mit } 23)$$

**Energieaufwand und Recycling von Kunststoffen (Zusammenstellung der Gleichungen) – Fortsetzung –**Energieaufwand für **n** frische Produktionen, mit  $\mathbf{E}_{FD} = \mathbf{E}_{FM}$  (Materialherstellung) +  $\mathbf{E}_{FB}$  (Beseitigung)

$$\mathbf{E}_{F, n} = \mathbf{n} \cdot \left[ \mathbf{E}_{FD} + \mathbf{E}_{FP} \right] \quad (34)$$

Energieaufwand für **n** Produktionen mit Recycling (mit  $\mathbf{E}_R$  = Recyclingenergie)

$$\mathbf{E}_{R, n} = \mathbf{n} \cdot \left[ \left( \mathbf{1} - \alpha_{A, n} \right) \cdot \mathbf{E}_{FD} + \alpha_{A, n} \cdot \mathbf{E}_R + \left( \mathbf{1} + \beta_n \right) \cdot \mathbf{E}_{FP} \right] \quad (39)$$

Energieaufwand für **n** Produktionen mit Verbrennung (mit  $\mathbf{E}^V_F$  = Verbrennungsenthalpie)

$$\mathbf{E}_{F, n}^{PV} = \mathbf{n} \cdot \left[ \left( \mathbf{1} - \alpha_{FV} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \right) \cdot \mathbf{E}_F^V + \mathbf{E}_{FM} + \mathbf{E}_{FP} + \mathbf{E}_{FB}^{nV} \right] \quad (49)$$

Energieaufwand für **n** Produktionen mit Recycling und Verbrennung

$$\mathbf{E}_{R, n}^{PV} = \mathbf{n} \cdot \left[ \left( \mathbf{1} - \alpha_{A, n} \right) \cdot \left( \mathbf{E}_{FD}^V + \left( \mathbf{1} - \alpha_{RV} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \right) \cdot \mathbf{E}_F^V \right) + \alpha_{A, n} \cdot \mathbf{E}_R + \left( \mathbf{1} + \beta_n \right) \cdot \mathbf{E}_{FP} \right] \quad (55)$$

Energieaufwand für **n** Produktionen mit Recycling und Verbrennung sowie **m** Produktnutzungen (mit  $\mathbf{E}_{NP}$  = Nutzungsenergie)

$$\mathbf{E}_{R, N}^{PV} = \mathbf{N} \cdot \left[ \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{m}} \left( \left( \mathbf{1} - \alpha_{A, n} \right) \cdot \left( \mathbf{E}_{FD}^V + \left( \mathbf{1} - \alpha_{FV} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \right) \cdot \mathbf{E}_F^V \right) + \alpha_{A, n} \cdot \mathbf{E}_R + \left( \mathbf{1} + \beta_n \right) \cdot \mathbf{E}_{FP} \right) + \left( \mathbf{1} + \gamma_m \right) \cdot \mathbf{E}_{NP} \right] \quad (58)$$

## Gleichungen

Öl-Ressourcenstreckung bei Kunststoffen  
(durch Materialrecycling und Verbrennung  
sowie bei Berücksichtigung der Herstellenergie)

$$S_E = \frac{E_{F,n}^{PV} \quad (n = N, oV)}{E_{R,N}^{PV}} \quad (59)$$

Deponieentlastung bei brennbaren Stoffen durch CO<sub>2</sub>-Erzeugung

$$S_D = \frac{m}{\left(1 - \alpha_{A,n}\right) \left(1 - \alpha_{RV} (1 - f)\right)} \quad (61)$$

CO<sub>2</sub>-Minderung durch Herstellenergieeinsparung bei Recycling

$$\delta_{CO_2} = \frac{\Delta E_{R,n}}{E_{F,n}} \quad (62)$$

## 4. Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recyclings – Grundsätzliche Betrachtungen

### 4.1 PVC-Begriffsklärung

PVC (Polyvinylchlorid) ist ein im wesentlichen amorphes, thermoplastisches Material mit vielfältigen Verarbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten. Es nimmt unter den Thermoplasten eine Sonderstellung ein durch:

- die thermische Instabilität des reinen Polymeren (Roh-PVC)
- durch sein rheologisches Verhalten (Fließverhalten)
- und wegen seiner hohen Aufnahmefähigkeit für Weichmacher und Füllstoffe.

Roh-PVC ist polymerisiertes Vinylchlorid ( $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ).

Der Gewichtsanteil von Kohlenwasserstoffen beträgt 43,5 %, der von Chlor 56,5 %.

Verarbeitungsfähig wird PVC erst durch Zumischung von verschiedenen Komponenten, PVC ist also ein Sammelbegriff für eine sehr große Zahl von Vielstoffgemischen. Unter Gebrauchsgesichtspunkten war PVC von Anfang an ein Kunststoff "nach Maß".

Die wichtigsten Herstellungsverfahren für Roh-PVC sind:

- a) Polymerisate (Pulver, Pasten) aus in Wasser fein verteiltem monomerem Vinylchlorid (VC, MVC)
  - Suspensionsverfahren
  - Emulsionsverfahren
- b) Pulver-Polymerisate direkt aus dem flüssigen, monomeren VC
  - Masseverfahren

Mit jedem Verfahren lassen sich die Eigenschaften des Roh-PVC auf bestimmte Anwendungsgebiete hin ausrichten.

Das reine Polymer (Roh-PVC) wird wie andere Kunststoffe auch durch eine Reihe von Zusatzstoffen (Additive) in weiten Bereichen variiert. Die wichtigsten Zuschlagstoffe sind nach *Gächter / Müller (1990)*:

- Antioxidantien (zur Verzögerung der thermischen Oxydation)
- Metalldesaktivatoren (Unterdrückung der metallkatalysierten Oxydation)
- Lichtschutzmittel (Verhinderung von lichtinduzierten Abbauvorgängen)

## PVC-Herstellung

- Stabilisatoren (Verhinderung der Chlorwasserstoffabspaltung – Dehydrochlorierung – bei thermischer Belastung)
- Weichmacher (Verbesserung der Flexibilität, Dehnbarkeit und Verarbeitbarkeit)
- Gleitmittel (Verbesserung der inneren und äußeren Fließfähigkeit)
- Verarbeitungshilfsmittel (Hochpolymere Additive zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften)
- Schlagzähigkeitsverbesserer (Hochpolymere Additive zur Verbesserung der Schlagzähigkeit)
- Füllstoffe (Stoffe zur Volumenvergrößerung)
- Verstärkungsmittel (Stoffe zur Verbesserung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften)
- Verstärkungsfasern (z. B. Textilglasfasern, Kohlenstofffasern)
- Farbmittel (unlösliche Pigmente und lösliche Farbstoffe)
- Flammenschutzmittel (Mittel zur Hemmung oder Unterbindung des Verbrennungsprozesses)
- Antistatika (Erhöhung der Leitfähigkeit zur Vermeidung von Aufladungen)
- Optische Aufheller (Erhöhung des Weißgrades)
- Biostabilisatoren (Stabilisierung gegen biologischen Angriff)
- Chemische Treibmittel (Addition für Gaserzeugung zur Bildung von Schaumstrukturen)

PVC-typische Zuschlagstoffe sind Stabilisatoren und Weichmacher. Eine Liste der zahlreichen Additive zur Erzeugung stabiler PCV-Vielstoffgemische zeigt Tabelle 6.

Die PVC-Vielstoffgemische (Roh-PVC-Anteil 30 ... 90 %) werden für spezielle Anwendungszwecke nach Rezepten als Pulver, Granulat oder Paste für die Verarbeitung zusammengestellt. Durch Aufschmelzen (180 – 210 °C) werden die thermoplastischen PVC-Vielstoffgemische zu Halbzeugen und Produkten verarbeitet.

Bei den Verarbeitungsverfahren dieser PVC-Vielstoffgemische unterscheidet man:

- Extrusion (z. B. Profile)
- Kalandrieren (z. B. Folien)
- Walzen
- Pastenverarbeitung (z. B. Beschichtungen)
- Spritzgießen (z. B. Gehäuse)
- Blasformen (z. B. Flaschen)
- Streckziehen
- Pressen.

Bei der gemeinsamen Verarbeitung von verschiedenen Kunststoffen ist die Verträglichkeit von der Aufschmelztemperatur, von möglichen chemischen Reaktionen und von den rheologischen Eigenschaften (Fließverhalten) abhängig. Die Verarbeitungstemperaturen von Kunststoffen zeigt Bild 7. Bei Überschreitung der relativ niedrigen Verarbeitungstemperaturen von PVC wird Chlorwasserstoff freigesetzt, die Materialstrukturen können zerstört werden, und die Anlagen un-

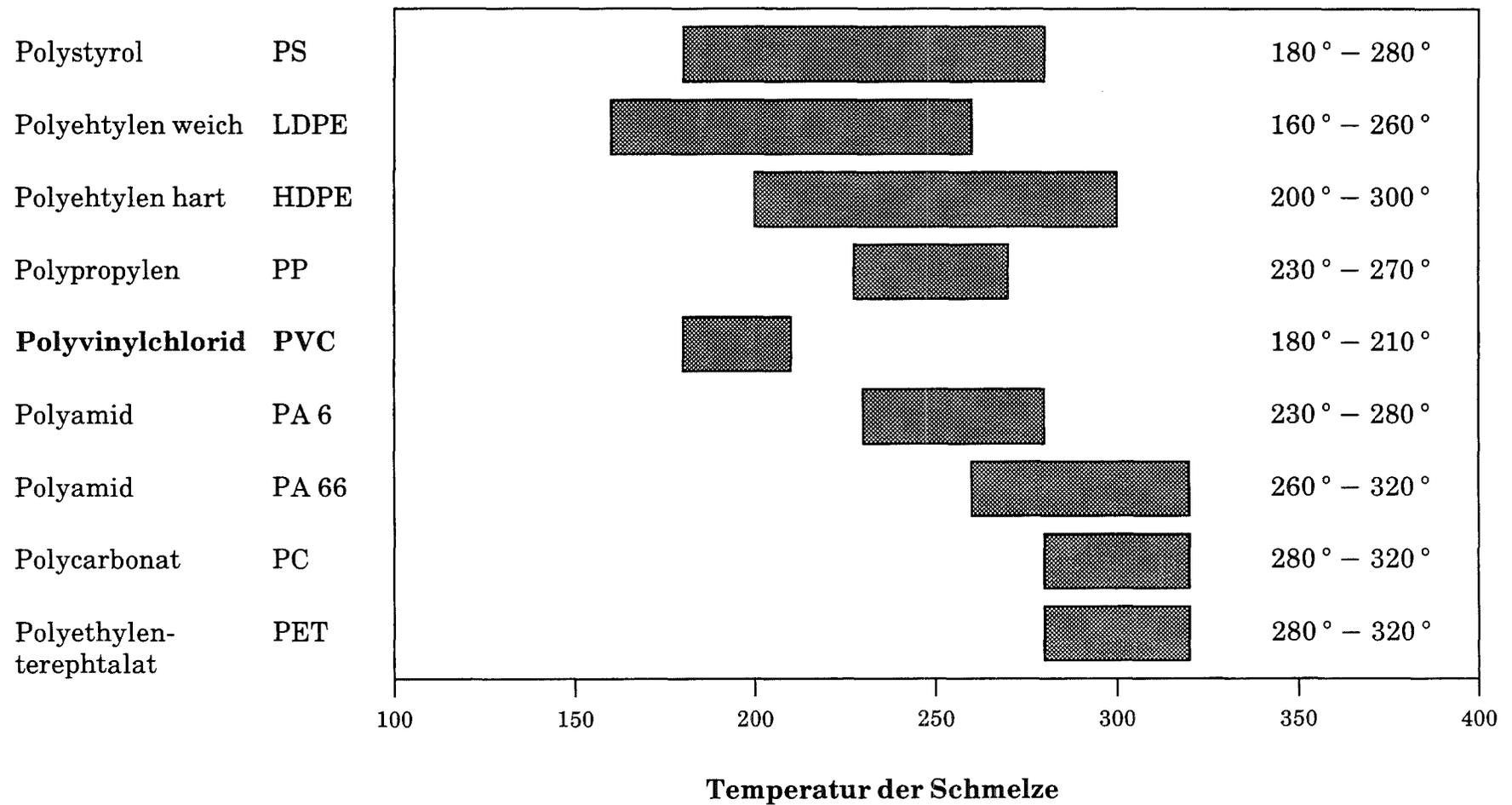
terliegen erhöhten Korrosionsgefahren. Eventuell durch die Verarbeitung anfallendes HCl kann mit Kreide gebunden werden.

Bei der gemeinsamen Verarbeitung von PVC mit anderen Massenkunststoffen ist die Verarbeitungstemperatur auf den Bereich der PVC-Verarbeitung von 180 – 210 °C begrenzt. Durch diesen niedrigen Temperaturbereich kann der Herstellungsprozeß behindert sein, weil die anderen Kunststoffe nicht genug aufschmelzen. Dabei stören insbesondere PET und Gummireste.

**Tabelle 6:** Additive zur Herstellung von Kunststoffen, insbesondere von PVC-Produkten [Becker / Braun, 1985, Lohrer / Plehn, 1987]

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

F = Farbstoffe  
P = Pigmente



**Bild 7:** Verarbeitungstemperaturen von Massenkunststoffen (nach Schönborn und eigene Eintragungen)

## 4.2 Lebensphasen des PVC

Es werden hauptsächlich vier **Lebensphasen des PVC** betrachtet. Sie sind in Bild 8 zusammenfassend dargestellt. Unterschieden wird:

### 1. Kunststoffherzeugende Industrie

Die **Grundstoff- und Roh-PVC-Herstellung** mit der Herstellung von Vinylchlorid (VC), Bild 9, weiteren Monomeren zur möglichen Mitpolymerisation (Co- und Ter-Monomere), Hilfsstoffen, Weichmachern und Zuschlagstoffen der Polymerisation und Entgasung sowie der Aufarbeitung der Polymerisate zu verkaufsfähigem Roh-PVC.

### 2. Kunststoffverarbeitende Industrie

Die **Verarbeitung** mit dem wichtigen Schritt der Herstellung verarbeitungsfähiger Mischungen aus Roh-PVC und Zuschlagstoffen zu Hart-PVC, sowie zusätzlich mit Weichmachern zu Weich-PVC; der eigentlichen Verarbeitung zu PVC-Produkten und der Wiederaufarbeitung von Verarbeitungsresten von nicht verkauften oder gebrauchten PVC-Produkten.

### 3. Handel und Verbraucher

Die **Gebrauchsphase** mit vorgedachtem (aber nicht eingezeichnetem) Handel und dem gesondert zu betrachtenden Brandfall<sup>11)</sup>.

### 4. Sekundärrohstoff- und Abfallwirtschaft

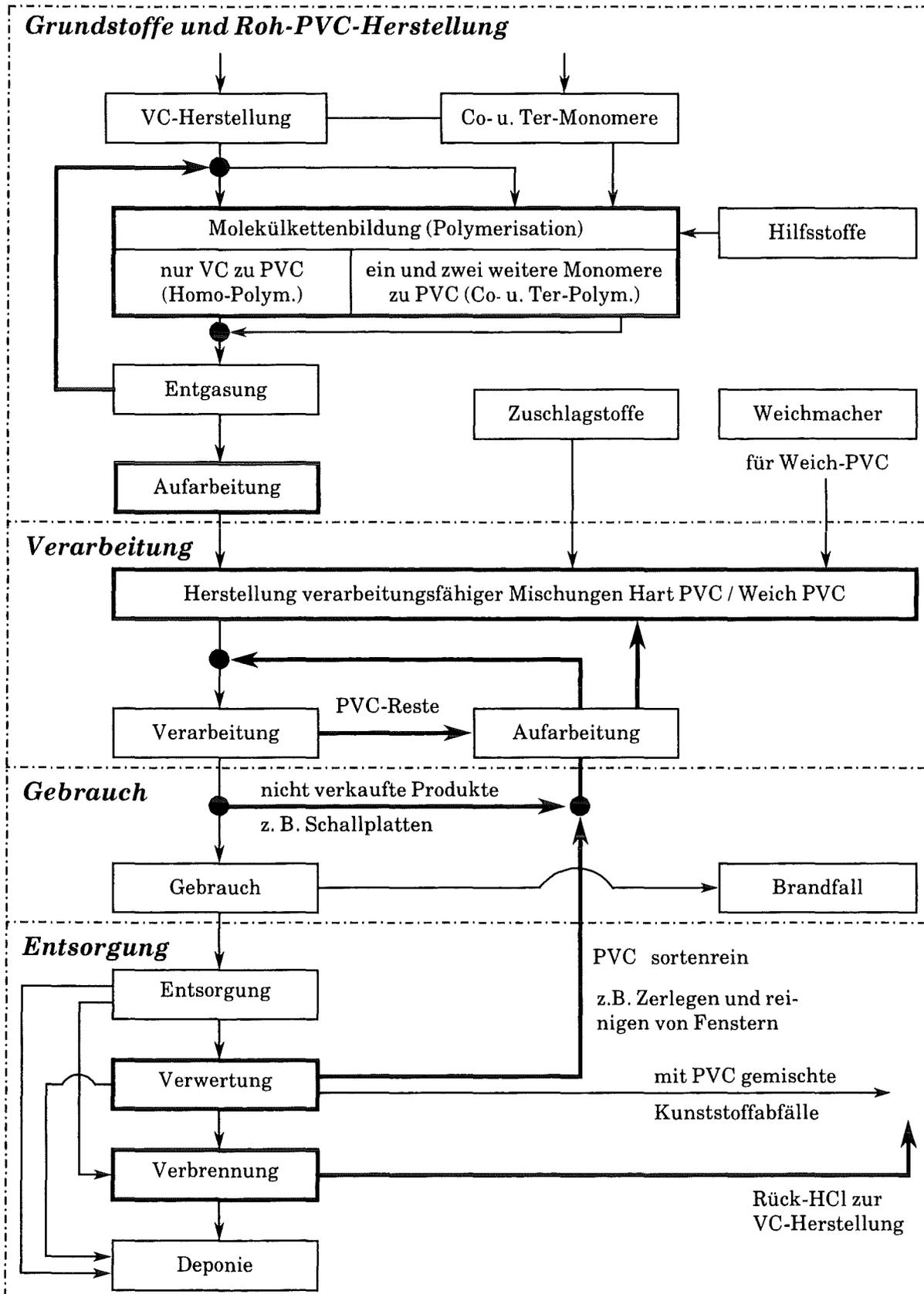
Die **Entsorgung** mit den nachfolgenden Schritten **Recycling** (sortenrein und gemischt mit anderen (Kunst-)Stoffen), **Verbrennung** mit möglicher HCl-Rückführung, sowie **Deponie**.

Die Emissionen in den verschiedenen Phasen des Lebensweges sind nicht gesondert angedeutet, ebenso nicht die gleichwohl existierenden Rückstandsverwertungen während der Herstellung.

In der BRD (alt) wird VC ( $C_2H_3Cl$ ) aus Ethylen ( $C_2H_4$ ) und Chlor ( $Cl_2$ ) oder Chlorwasserstoff (HCl) hergestellt. Die Herstellung aus Acetylen ( $C_2H_2$ ) und HCl durch Hydrochlorierung wurde aufgegeben.

---

11) Brände von PVC im Herstellungs- und Entsorgungsbereich werden nicht extra ausgewiesen. Im Unterschied zu anderen Kunststoffen führt der Brandfall bei PVC zu Salzsäure- und Dioxinbildung und erfordert deshalb häufig eine aufwendige Entsorgung.



**Bild 8:** Schritte im PVC-Lebensweg von der VC-Herstellung bis zur Deponie unter Einschluß von Recycling (Emissionen bei den Prozessschritten sind hier nicht extra hervorgehoben)

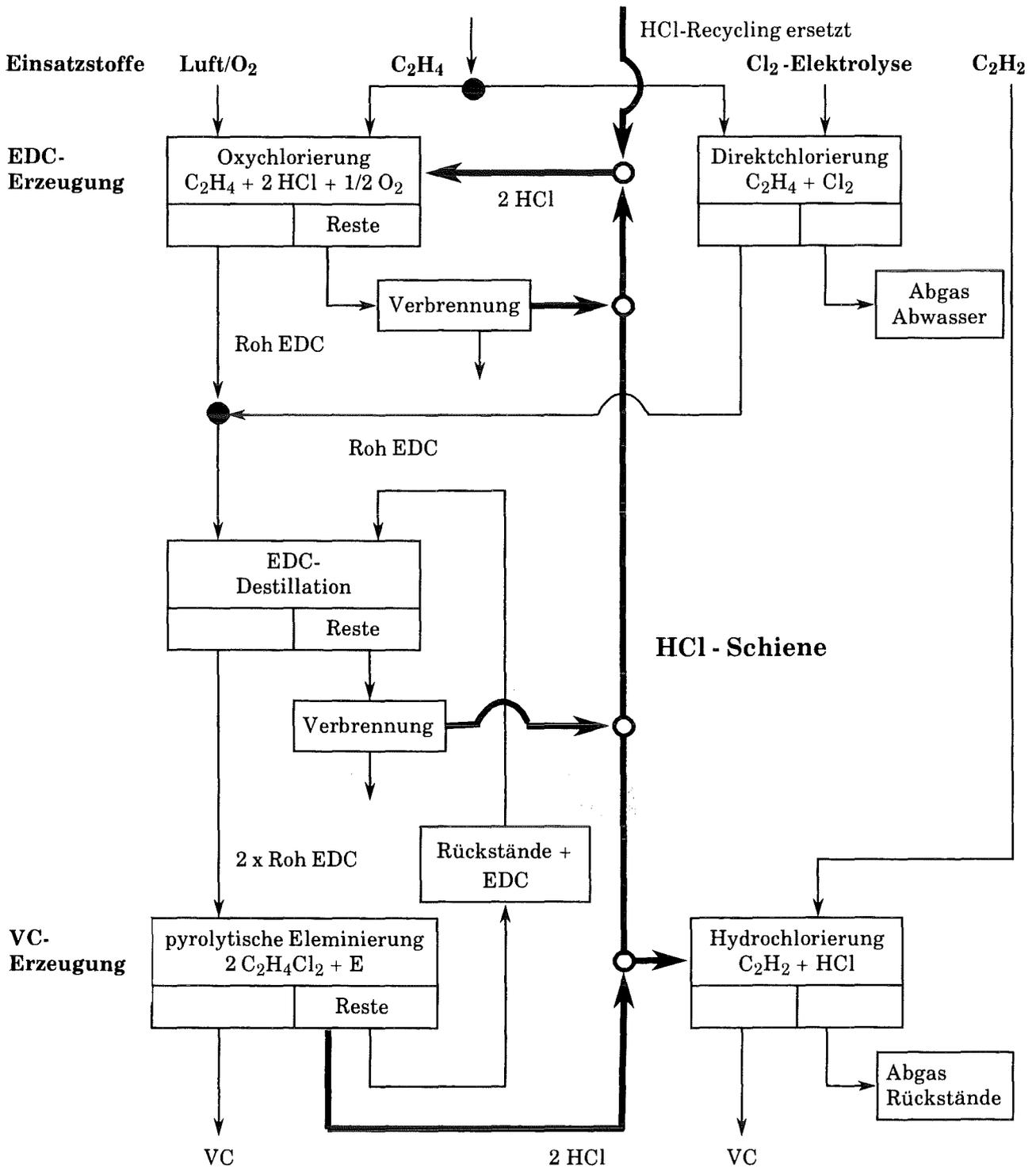


Bild 9: Erzeugung von Vinylchlorid (VC) mit Verwendung von rezykliertem HCl

### **Kombiniertes Ethylen-Verfahren**

Im Herstellungsprozeß von VC aus Ethylen wird als Zwischenprodukt Ethylen-dichlorid (EDC), auch 1,2-Dichlorethan bezeichnet ( $C_2H_4Cl_2$ ), benötigt. Aus EDC wird in einem Pyrolyseprozeß bei hoher Temperatur HCl abgespalten und zurück bleibt VC.

Der Chlorwasserstoff kann in der EDC-Herstellung zur Chlorierung des Ethylens verwendet werden. Im Oxychlorierungsverfahren geschieht dies durch eine katalytische Austauschreaktion von 2 HCl mit Sauerstoff ( $\frac{1}{2} O_2$ ) zu Wasser ( $H_2O$ ) und Anlagerung des verbleibenden Chlors ( $Cl_2$ ) an Ethylen.

Die Pyrolyse des EDC's aus der Oxychlorierung liefert nur die Hälfte des benötigten Chlorwasserstoffs. Der Rest muß entweder aus anderen Quellen besorgt werden oder kann durch Pyrolyse von EDC erfolgen, das durch ein anderes Verfahren und direkter Anlagerung von  $Cl_2$  an Ethylen erzeugt wird, anstelle des Weges über HCl und Sauerstoff.

Die Kombination der drei Verfahren Direktchlorierung, Oxychlorierung und Pyrolyse erlaubt eine flexible Produktion. Es kann mit ausgeglichener HCl-Bilanz gefahren werden, wenn HCl im Kreis geführt wird. Es besteht außerdem die Möglichkeit, geeignetes HCl aus anderen Prozessen einzusetzen, bei Verminderung des Anteils der Direktchlorierung.

In der Herstellphase wird die VC-Gasrückführung aus der Entgasungsstufe im Anschluß an die Polymerisation besonders hervorgehoben, ebenso die Rückführung von PVC aus Produkten nach der Herstellphase. Auf die Möglichkeit der HCl-Rückführung nach der Verbrennung von nicht rückführbaren PVC-Produkten wird hingewiesen.

Eine Liste der PVC-Produkte zeigt Tabelle 7. Diese Produkte haben alle Lebensbereiche erfaßt. Die Produktnutzungszeiten (Lebensdauer) liegen zwischen wenigen Wochen und einigen Jahrzehnten.

**Tabelle 7:** Anwendungsbereiche von PVC

<p><b>PVC im Bausektor</b></p> <p><b>Außeneinsatz an Gebäuden</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Fenster</li><li>– Rolläden</li><li>– Balkonprofile</li><li>– Dachrinnen</li><li>– Flachdachfolien und -zubehör</li><li>– Lichtkuppeln</li><li>– Lichtwände und -dächer</li><li>– Sonstige Bauteile für den Außeneinsatz</li></ul> <p><b>Inneneinsatz in Gebäuden</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Fußbodenbeläge</li><li>– Deckenelemente</li><li>– Wandbekleidungs-elemente</li><li>– Tapeten</li><li>– Trennwände</li><li>– Türen</li><li>– Dachunterspannbahnen</li><li>– Rohre</li><li>– PVC-weich-Profile</li><li>– PVC-hart-Profile</li><li>– Sonstige Bauteile für den Innenausbau</li></ul> <p><b>Textile, Bauwerke und Bauteile</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Membranen</li><li>– Traglufthallen</li><li>– Mehrfachmembran-Tragwerke</li><li>– Markisen, Sonnensegel</li></ul> <p><b>Tiefbau</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Schwimmbecken</li><li>– Abdichtungen im Hoch-, Tief- und Wasserbau</li></ul>
<p><b>Rohre aus PVC</b></p> <p><b>Rohrverbindungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Druckrohrverbindungen</li></ul> <p><b>Rohrverbindungen für drucklose Leitungen</b></p> <p><b>Formteile und Armaturen - Anwendungsgebiete</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Entwässerungskanäle und -leitungen (KG-Rohre)</li><li>– Kabelkanal- und Kabelschutzrohre</li><li>– Trinkwasserleitungen</li></ul>

**Tabelle 7:** Anwendungsbereiche von PVC – Fortsetzung –

<ul style="list-style-type: none"> <li>– Drän- und Sickerleitungen</li> <li>– Gasleitungen</li> <li>– Dachrinnen und Regenfalleitungen</li> <li>– Industrieleitungen</li> <li>– Hausabflußleitungen und sanitäre Installationen</li> <li>– Druck- und Vakuumentwässerung</li> <li>– Rohrleitungen im Schiffsbau</li> <li>– Elektroinstallationsrohre und Zubehör</li> <li>– Kunststoff-Filterrohre und Aufsatzrohre</li> </ul>
<p><b>PVC im Apparatebau</b></p> <p><b>Anwendung von PVC-hart in der Fortlufttechnik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Gasreinigungsanlagen</li> <li>– Sonderbauteile</li> <li>– Fortluftrohre</li> <li>– Ventilatoren</li> <li>– Fortluftkamine</li> </ul> <p><b>Apparate in der Photoindustrie und Phototechnik</b></p> <p><b>Anlagen aus PVC für chemische und elektrolytische Oberflächenbehandlungen von Metallen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Beizen, Ätzen, Brennen und Glänzen von metallischen Oberflächen</li> <li>– Ätzanlagen für Leiterplatten und metallische Folien</li> <li>– Galvanisierungsanlagen</li> </ul> <p><b>Anwendungen von PVC in der Chloralkali-Elektrolyse</b></p> <p><b>Verbundbau PVC hart mit GFK</b></p>
<p><b>PVC im Elektrosektor</b></p> <p><b>PVC-Kabel und -Leitungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– PVC-Isolierungen</li> <li>– PVC-Mäntel und PVC-Korrosionsschutzhüllen</li> </ul> <p><b>PVC-Elektro-Isolierbänder</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– PVC-Trägerfolie</li> <li>– Kleber</li> </ul> <p><b>PVC-Separatoren für Akkumulatoren</b></p> <p><b>Weitere Anwendungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– PVC-Isolierschläuche</li> <li>– PVC-Installationsrohre</li> <li>– PVC-Kabelschutzrohre</li> </ul>

**Tabelle 7:** Anwendungsbereiche von PVC – Fortsetzung –

<ul style="list-style-type: none"><li>– PVC-Verdrahtungskanäle</li><li>– PVC-Installationskanäle</li></ul>
<p><b>PVC im Kraftfahrzeugsektor, Transport- und Verkehrswesen</b></p> <p><b>Kraftfahrzeugsektor</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Karosseriebereich</li><li>– Fahrgastraum</li><li>– Nutzfahrzeugsektor</li></ul> <p><b>Transportwesen</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Schienenfahrzeuge</li><li>– Wasserfahrzeuge</li></ul> <p><b>Verkehrssektor</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Sicherheitseinrichtungen für die Verkehrslenkung</li><li>– Straßenmarkierung</li></ul>
<p><b>PVC im Verpackungssektor</b></p> <p><b>Packstoffe</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– aus PVC hart und</li><li>– aus PVC weich</li></ul>
<p><b>PVC im Möbel-, Einrichtungs- und Haushaltssektor</b></p> <p><b>Möbel und Zubehör</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Möbelprofile</li><li>– Möbeloberflächen</li><li>– Sitzmöbelbezüge</li></ul> <p><b>Einrichtungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Mobile Bodenbeläge</li><li>– Vorhänge und Gardinenschienen</li></ul> <p><b>Haushalt</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Tischdecken</li><li>– Gerätetiele</li><li>– Bürsten und Besen</li><li>– Sonstiges</li></ul>
<p><b>PVC im Bekleidungs-, Täschner- und Schuhsektor</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Regenbekleidung</li><li>– Arbeitsschutzkleidung</li><li>– Modisches Zubehör</li></ul>

**Tabelle 7: Anwendungsbereiche von PVC – Fortsetzung –**

<p><b>Täschnerwaren</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hand- und Einkaufstaschen</li> <li>– Koffer und Reisetaschen</li> <li>– Schulzubehör</li> <li>– Ausweistaschen, Portemonnaies und Necessaires</li> </ul> <p><b>Schuhwerk</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Stiefel</li> <li>– Vollplastikschuhe</li> <li>– Sandalen</li> <li>– Kunstlederschuhe</li> <li>– Sohlen</li> <li>– Schuhausrüstung</li> </ul>
<p><b>PVC im Büro-, Buch-, Photo- und Werbesektor</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Schreiben, Zeichnen und Drucken</li> <li>– Ordnen und Registrieren</li> <li>– Buchsektor</li> <li>– Photosektor</li> <li>– Kleben, Markieren, Werben</li> </ul>
<p><b>PVC im Sport-, Spiel- und Freizeitsektor</b></p> <p><b>Sport und Spiel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Sportgeräte</li> <li>– Sportbekleidung</li> <li>– Sporttaschen und Hüllen</li> <li>– Aufblasartikel</li> <li>– Puppen und Spieltiere</li> </ul> <p><b>Freizeit</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Zelte und Zubehör</li> </ul> <p><b>Gartenfiguren</b></p> <p><b>Schallplatten</b></p> <p><b>Bastelzubehör, didaktisches Spielzeug</b></p>
<p><b>Sonstige Anwendungen von PVC</b></p> <p><b>Medizin</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Blutbeutel und Transfusionsschläuche</li> <li>– Medizinische Schläuche</li> <li>– Hörgeräte</li> <li>– Prothetik</li> </ul>

**Tabelle 7:** Anwendungsbereiche von PVC – Fortsetzung –

**Landwirtschaft und Gartenbau**

- Be- und Entwässerung
- Ernteverfrühung
- Gewächshäuser
- Blumen- und Pflanzenanzucht
- Stallungen und Viehhaltung
- Fischaufzucht
- Güllegruben
- Silos
- Lager- und Transportbehälter
- Gartenzubehör
- Baumbelüfter

**Bergbau**

- Rohre
- Wetterlütten
- Sonderlütten
- Fördergurte
- Wasserseigen und Sumpfauskleidungen
- Wassertröge
- Leitungen und Kabel

**Arbeitstechnik**

- Pendeltüren
- Abschirmfolien für Schweißer-Arbeitsplätze
- Beschilderungen und Absperrungen
- Gewässer- und Küstenschutz

### 4.3 Energiebedarf – Vergleich Neuproduktion / Materialrecycling

Mit einem Vergleich des Energiebedarfs für PVC-Neuware und PVC-Rezyklat<sup>12)</sup> soll das Energieeinsparungspotential durch PVC-Recycling abgeschätzt werden.

#### 4.3.1 Energiebedarf für Neu-PVC

##### *Basisdaten zum Primärenergiebedarf*

Am häufigsten werden in diesem Zusammenhang die Arbeiten von *Kindler / Nikles (1979, 1980)* zitiert. Bei der Ermittlung der Zahlenwerte von Chemieprodukten mußten sie meist auf eigene Erfahrungswerte oder auf ihnen zugängliche, nicht publizierte Unterlagen Dritter zurückgreifen. In der Arbeit von 1980 wurden die Ergebnisse von 1979 auf der Grundlage von Diskussionen präzisiert, ergänzt und modifiziert. Die Grundlinien für die Berechnung von **Energieäquivalenzwerten**<sup>13)</sup> wurden über den Verband Kunststoffherstellende Industrie e.V. (VKE) mit den deutschen Kunststoffherstellern abgestimmt. **Diese damaligen Abstimmungen berücksichtigen das Recycling nur am Rande und unter heutigen Gesichtspunkten unvollständig**

In der Arbeit von *Kindler / Nikles (1979)* werden folgende Angaben gemacht:

Der Energieäquivalenzwert für alle in der Natur vorkommenden *Rohstoffe* wird auf der Basis ihrer Verbrennungsenthalpie (unterer Heizwert) festgelegt: der Verbrennungsenthalpie wird der Aufwand für die Förderung und den Transport von den Lagerstätten zum Verarbeitungsbetrieb hinzu addiert, lediglich der Eigenverbrauch an Rohstoff bei seiner Förderung wird nicht einbezogen.

– Verbrennungsenthalpie von Erdöl: 43 MJ/kg.

Der Anteil von Kohlenwasserstoffen in PVC beträgt 43,5 %, der Rest ist Chlor. Daraus berechnet sich vereinfacht eine Verbrennungsenthalpie von 18,7 MJ/kg. Verwendete Zahlenwerte sind in Tabelle 8 wiedergegeben.

12) Es bestand noch 1980 die Auffassung: "Langlebige Güter, etwa im Bauwesen, kommen dagegen für ein Recycling weniger in Betracht" [*Kindler / Nikles, 1980*].

13) Siehe Abschnitt 3 mit einer recyclinggerechten Definition. Der von *Kindler / Nikles* definierte Energieäquivalenzwert gilt für den Fall, daß der gesamte Kunststoff auf die Deponie geworfen wird, ohne daß dazu weitere Energie benötigt würde.

**Tabelle 8:** Verbrennungsenthalpie für PVC (MJ/kg)

PVC	Kindler / Nikles 1979 / 1980	Habersatter 1991
Verbrennungsenthalpie (MJ/kg)	ca. 18	17,24

Für die Herstellung aller Produkte werden die wirtschaftlich optimalen Verfahren zugrunde gelegt, die bereits in großtechnischem Maßstab betrieben werden; es müssen nicht immer die mit dem günstigsten Energieverbrauch sein. Für alle **Hilfsenergien** werden die zu ihrer Bereitstellung erforderlichen **Primärenergie-mengen** eingesetzt.

Als *Energieäquivalenzwert* wird der gesamte Energie- und Rohstoffaufwand definiert, der zur Herstellung eines Produktes, z. B. eines Werkstoffs oder eines Fertigteils, oder für die Bereitstellung von Energie aufzuwenden ist; nicht berücksichtigt wird der Energieaufwand für die Errichtung und Instandhaltung der Produktionsanlagen und der zur Beseitigung des Kunststoffes. Verwendete Zahlenwerte sind in Tabelle 9 wiedergegeben.

**Tabelle 9:** Energieäquivalenzwerte für PVC (MJ/kg)

PVC	Kindler / Nikles		Habersatter
	1979	1980	1991
Materialherstellenergie (MJ/kg)	33	35	33,86
Energieäquivalenzwert (Deponie) (MJ/kg)	51	53	51,1

Für 1 kWh **elektrische Nutzenergie** werden für die Kunststoff-Erzeugung und die Kunststoffverarbeitung unterschiedliche Erzeugungsverfahren zugrundegelegt, so daß sich die Wirkungsgrade (zudem noch je nach Autor) unterscheiden. Der Strom für die **Kunststoff-Erzeugung** wird danach zu **50 % aus Kraft-Wärme-Kopplung (Gegendruckturbine)** und zu **50 % aus Kondensationskraftwerken** gewonnen. Der Strom für die **Kunststoff-Verarbeitung** wird über das **öffentliche Netz** bereitgestellt (keine Kraft-Wärme-Kopplung). Verwendete Zahlenwerte sind in Tabelle 10 wiedergegeben.

**Tabelle 10:** Umrechnungsfaktoren Primärenergie in elektrische Nutzenergie  
 [Kindler/Nikles, 1979 und 1980]

PVC	Primärenergieäquivalent (MJ <sub>th</sub> /kWh)			
	1979	η (%)	1980	η (%)
Kunststoff-Erzeugung	6,25	58	7,35	49
Kunststoff-Verarbeitung	10,14	36	10,2	35

*Tötsch (1992)* verwendet das Argument "PVC ist der Kunststoff mit dem niedrigsten Energieäquivalent", nimmt Bezug auf eine Tabelle von *Habersatter (1991)* und führt an:

"... PVC erweist sich als der Kunststoff mit dem niedrigsten Energieverbrauch pro Masse. Die Herstellung von 1 kg PVC benötigt **1,34 kWh Strom** und **20,14 MJ Prozeßwärme**. Für die Bereitstellung wird nach dem Modell UCPTE für das westeuropäische Stromverbundsystem ein mittlerer Wirkungsgrad von **37,8 %** angesetzt. 1 kWh Strom entspricht deshalb **9,524 MJ Primärenergie**. Der Energieinhalt der verwendeten **Rohstoffe** beträgt **17,24 MJ**. Insgesamt ergibt sich ein Primärenergiebedarf von **51,1 MJ/kg**. Nur ein kleiner Teil dieses Energiebedarfs (9 MJ/kg)<sup>14)</sup> kann in der Müllverbrennung zurückgewonnen werden".

### *Unstimmigkeiten bei den Basisdaten*

*Friege et al. (1992)* kommentieren diese Ausführungen von *Tötsch (1992)* in einer Stellungnahme wie folgt:

"... Wie *Tötsch* weiter richtig feststellt, ist der größte Teilbetrag an diesem Energieäquivalenzwert der Strombedarf für die Chlor-Alkali-Elektrolyse zur Bereitstellung des Vorproduktes Chlor. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Strom aus (werksinternen) Kraftwerken mit einem hohen Primärenergiewirkungsgrad (ca. 60 Prozent) stammt. Dies ist unrealistisch, da die Chlor-Alkali-Elektrolyse als typischer Grundverbraucher dem entsprechenden Grundlastkraftwerkspark (vgl. *Fritsche et al., 1989*) zuzuordnen ist. Damit beträgt der Primärenergiewirkungsgrad für die Bereitstellung von Strom ("frei Industrie") lediglich 33,2 Prozent (vgl.

14) Siehe Unstimmigkeiten weiter unten.

## Energiebedarf

*Fritsche et al., 1989*). Für den Energieäquivalenzwert von PVC ergibt sich dann eine auch im Vergleich zu anderen Standard-Kunststoffen wesentlich höherer Energieäquivalenzwert von ca. 90 MJ/kg PVC".

Wieso *Friege et al.* das Argument zum Stromerzeugungswirkungsgrad auf die gesamte Prozeßenergie ausweitet, bleibt unklar. Das würde voraussetzen, daß die gesamte Prozeßenergie aus Strom gewonnen wird. Weiterhin dürften sie bestenfalls die Herstell- und Entsorgungsenergie von 35 MJ/kg mit dem niedrigeren Wirkungsgrad beaufschlagen. Der Quotient aus den Werten von *Kindler / Nikles*  $\eta = 58 \%$  (1979) bzw.  $\eta = 49,2 \%$  (1980) und *Friege*  $\eta = 33,2 \%$  ergibt einen Faktor 1,75, bzw. 1,48, d. h. 61 MJ/kg bzw. 52 MJ/kg Herstell- und Entsorgungsenergie, so daß sich ein Energieäquivalenzwert von 79 MJ/kg (1979) bzw. 70 MJ/kg (1980) ergeben würde.

In *Tötsch / Pollack (1992)* wird ein Strombedarf von 1,34 kWh/kg wiedergegeben. Wendet man den Wirkungsgradeinwand nur auf den Strom an, was einleuchtend erscheint, so muß zunächst geprüft werden, wie die Werte von *Kindler / Nikles, Tötsch* bzw. *Habersatter* zusammenpassen.

Bei *Kindler / Nikles* würde sich ein Primärenergiebedarf von  $1,34 \cdot 6,25 \text{ MJ/kg} = 8,38 \text{ MJ/kg}$  (1979) bzw.  $1,34 \cdot 7,35 \text{ MJ/kg} = 9,85 \text{ MJ/kg}$  (1980) ergeben. Bliebe für die Prozeßenergie  $(33 - 8,38) \text{ MJ/kg} = 24,62 \text{ MJ/kg}$  (1979) bzw.  $35 - 9,85) \text{ MJ/kg} = 25,15 \text{ MJ/kg}$  (1980). *Tötsch* gibt dagegen 20,15 MJ/kg an, aus *Habersatter's* Daten ergeben sich 21,1 MJ/kg. Gegenüber dem Wert von *Tötsch* beträgt die maximale Differenz 5 MJ/kg, das ist nicht vernachlässigbar. Jedoch ist zu bedenken, daß der Stromverbrauch von 1,34 kWh/kg mangels anderer Daten hier über alle Jahre gleich angenommen wurde.

Bei *Friege* würde sich der Äquivalenzwert für Strom gegenüber *Kindler / Nikles* um den Faktor  $58 / 33,2 = 1,75$  (1979) bzw.  $49 / 33,2 = 1,48$  (1980) erhöhen und zu einem Mehrbetrag von 6,3 MJ/kg (1979) bzw. 4,7 MJ/kg (1980) führen; gegenüber *Tötsch* würde sich ein Faktor  $37,8 / 33,2 = 1,14$  und ein Mehrbetrag von 1,8 MJ/kg ergeben. Das ist längst nicht mehr so dramatisch, wie mit 39 MJ/kg Mehrbedarf bei *Friege et al.* (offensichtlich fehlerhaft) ausgerechnet.

*Richter (1992)* bezieht sich auf Angaben von *Mosthaf / Nikles (1990)* und nennt für Profile aus weißem Hart-PVC folgende Werte:

– Energie pro kg PVC:        13,4 kWh

Dieser Wert ist nicht nachvollziehbar.

In einem Diagramm gibt *Richter (1992)* den Energieverbrauch für PVC-Fensterprofile (Herstellung brutto) mit 700 KWh an. Bei einem aus Angaben der AgPU (1992) errechneten durchschnittlichen Fenstergewicht von 14 kg ("... aus 7 000 t Profilabschnitten können rund eine halbe Million Fenster hergestellt werden") würde sich der von *Richter* angegebene Energieverbrauch für 1 kg Fensterprofil mit 700 KWh/14 kg zu 50 KWh errechnen. Dieser Wert ist nicht nachvollziehbar.

Die von *Habersatter* angenommene und von *Tötsch* wiedergegebene Nutzung von 9 MJ/kg in MVA's bedeutet einen thermischen Wirkungsgrad von 50 %. Das setzt eine effektive Kraft-Wärme-Kopplung voraus. Insbesondere in Sommermonaten ist dies für große Anlagen fraglich, da der Wärmeabnehmer fehlen könnte.

Für reine Stromerzeugung kann bestenfalls mit 15 % – 25 % Wirkungsgrad gerechnet werden, d. h.  $\epsilon \approx 0,4 - 0,6$  bei 40 %-Wirkungsgrad der konventionellen Stromerzeugung.

### **Basisdaten zur Kunststoff-Verarbeitung**

Für die **Kunststoff-Verarbeitung** werden Energieäquivalenzwerte angegeben (ohne Verarbeitungsverluste und Transport), die in Tabelle 11 wiedergegeben sind. Als Bezugsquelle wird bei *Thalmann (1992)* das Modell "Kunststoffindustrie BRD" mit BASF-Grundwerten genannt.

**Tabelle 11:** Verarbeitungsenergieäquivalent (MJ<sub>th</sub>/kg)

PVC	Kindler / Nikles	Thalmann
	1980	1992
Folienextrusion	3 – 6	–
Kalanderfolie PVC	~ 6	–
PVC-Folie	–	7,4
Rohrextrusion	3 – 5	–
Blasformen	5 – 15	–
PVC-Becher	–	9,3
Spritzgießen	5 – 15	–

Der Verarbeitungsaufwand liegt danach bei 9 – 43 % des Energieaufwandes für die Herstellung des PVC-Pulvers.

#### 4.3.2 Energiebedarf für Recycling-PVC

*Tötsch / Gaensslen (1990)* geben folgende Werte für den Energiebedarf verschiedener Aufbereitungsverfahren an:

Das Zerkleinern (Mahlen) von einer Tonne sortenreinen, sauberen PVC-Reststoffen erfordert je nach Aufwand 25 bis 250 KWh Strom (*Leschonski et al., 1991; Herbold, 1987*).

Das Zerkleinern, Waschen, Trennen, Trocknen und Granulieren erfordert 700 KWh Strom pro Tonne Kunststoff (PE, kommerzielle Anlagen) [*Stolzenberg, 1989*].

#### 4.3.3 Energieeinsparungspotential durch PVC-Recycling

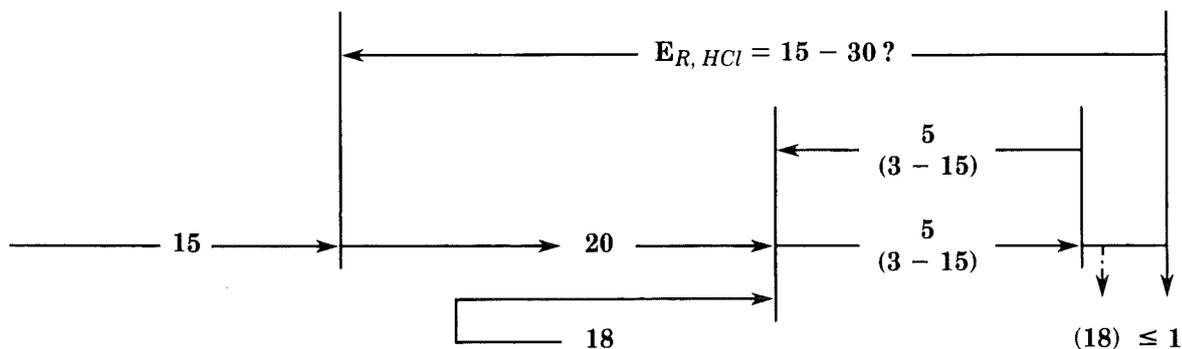
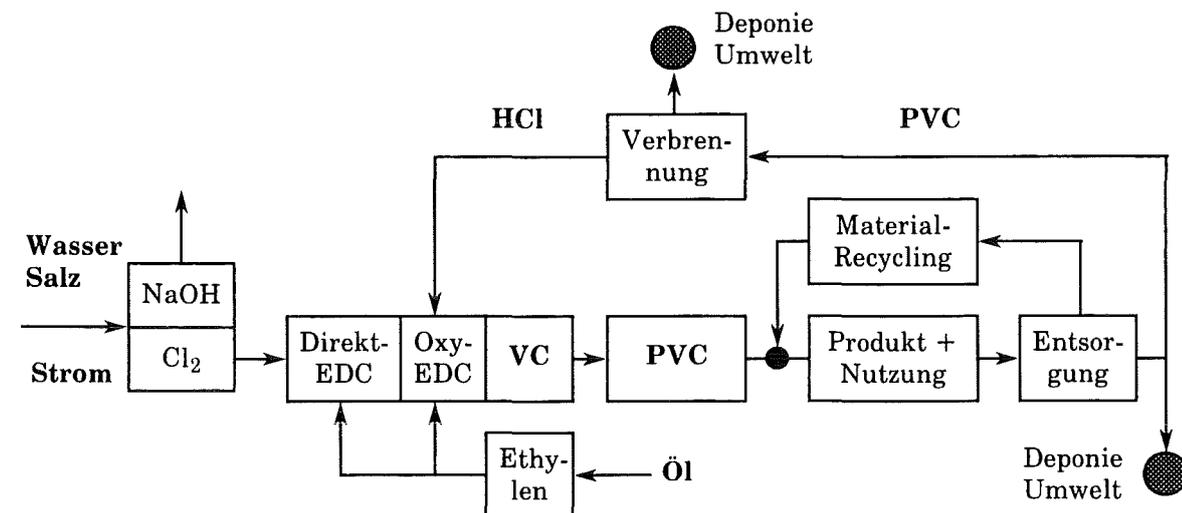
Nach obigen Ausführungen beträgt der **Gesamtenergiebedarf** (Energieäquivalenzwert) für eine Tonne Neu-PVC in Pulverform **53 GJ**. Produziert werden etwa 1,4 Mio Tonnen/Jahr. Für die Erzeugung von einer Tonne Rezyklat-PVC in Pulverform (aus sortenreinen, sauberen Produktions- und Verarbeitungsabfällen) werden 250 KWh benötigt. Für die Erzeugung einer Tonne Rezyklat-PVC in Pulverform aus sortenreinen gebrauchten PVC-Abfällen liegen uns keine Daten vor. Wir nehmen einmal an, daß für Logistik und Beseitigung der Fremdstoffe in einem Branchenmodell für das Recycling gebrauchter PVC-Abfälle (*nur Fenster, nur Rohre, usw.*) auch soviel Energie aufgewendet werden muß, wie bei der Aufbereitung sortenreiner Produktionsabfälle. Das ergibt zusammen **500 KWh/t PVC-Rezyklat** aus gebrauchten PVC-Abfällen.

Als **Umrechnungsfaktor** wählen wir **10 MJ/kWh** und erhalten **5 GJ/t**. Berücksichtigt werden muß noch ein Mehraufwand für die gleichzeitige Verwendung von Frisch- und Recyclingware in der Produktherstellung, den wir mit 15 % (von ebenfalls 5 GJ/t) ansetzen. Im Vergleich zur Neuproduktion des Materials ist der Energieaufwand für das sortenreine Recycling mit rund 10 % sehr klein. Dadurch ergibt sich beim Einsatz von einer Tonne sortenreinem Rezyklat-PVC anstelle von einer Tonne Neu-PVC eine beträchtliche Energieeinsparung. Eine zusammenfassende Darstellung der Energieaufwendungen für die verschiedenen Prozeßstufen sowie die Kreisprozesse zeigt das Bild 10. Für die Erzeugung von Chlor über die Kochsalzelektrolyse werden 15 MJ/kg aufgewendet<sup>15)</sup>. 20 MJ/kg erfordern die

---

15) Dieser Wert ist errechenbar mit den Annahmen: Energiebedarf (Strom) 3 000 kWh/t Chlor und Chlorgehalt PVC: 50 %.

VC-Herstellung, die PVC-Polymerisation und die Herstellung verarbeitungsfähiger Granulate und Pasten. Die im Material befindliche Energie von 18 MJ/kg wird direkt oder nach Recycling auf die Deponie verbracht (strichlierter Pfad), wenn nicht verbrannt wird.



**Bild 10:** Kreisprozesse und Energieaufwand [MJ/kg] für Roh-PVC und PVC-Produkte

Im unerreichbaren Idealfall von 100 % Recycling und beliebig häufiger Wiederaufbereitung ergibt sich der Illusionswert einer 90 %-igen **Einsparung**. Realistisch dürften, je nach Recyclingquote und Nutzungszahl des Materials, Werte zwischen 15 % und bestenfalls 50 % sein.

**Das Energieeinsparpotential durch branchenspezifisches und damit sortenreines PVC-Recycling ist auch bei realistischer Betrachtung durchaus nicht vernachlässigbar.**

### HCl-Rückgewinnung durch PVC-Verbrennung

Die Vielfalt der PVC-Produktpalette und die Vermischung von PVC mit anderen Stoffen läßt gegenwärtig nur sehr kleine Materialrecyclingquoten zu.

Die weitaus größere Menge muß deponiert oder verbrannt werden. Bei der Verbrennung PVC-reicher Reststoffe fällt gleichzeitig viel korrosives HCl an, so daß nur Spezialanlagen dafür in Frage kommen. Es liegt dann nahe, das HCl in den Produktionsprozeß zurückzuführen (Vorproduktrecycling). Im Fall der Verbrennung würde man von Verbrennungsenergierecycling sprechen können, wenn diese Energie nutzbringend eingesetzt wird (Primärenergieersatz).

Es soll untersucht werden, welcher Energieaufwand mit diesem Konzept im Vergleich zur ausschließlich frischen Herstellung von Chlor verbunden ist, wenn die frisch zu erzeugende Chlor-Menge um den aus der Verbrennung gewonnenen HCl-Anteil vermindert wird<sup>16</sup>).

Die in diesem Recyclingprozeß benötigte Energie zur Produktion von HCl und dann von VC sei  $E_{RHCl}$ , mit

$$E_{RHCl} = E_{FCl_2} \pm E_{ZHCl/VC} \quad (63)$$

Mit  $E_{ZHCl/VC}$  wird die Energie beschrieben, die zusätzlich aufgewendet werden muß (+) oder eingespart werden kann (-), wenn der Recyclingpfad mehr oder weniger Energie erfordern sollte, als der frische Pfad. Es ist  $\epsilon = 1$ , da der mögliche zusätzliche Aufwand / Gewinn bereits in  $E_{ZHCl/VC}$  steckt.

Zu berücksichtigen sind:

- der Aufwand in der Verbrennungsanlage für die PVC-Reste,
- der Mehraufwand in Oxychlorierung und Destillation durch den Wegfall der exothermen Direktchlorierung,
- evtl. zusätzlicher Logistikaufwand.

Zugrunde gelegt wird die Gl. (55) für den Energieäquivalenzwert für Recycling und Verbrennung. Die Materialdurchflußenergie  $E_{VFD}$  in dieser Gleichung und die darin berücksichtigte Materialherstellenergie  $E_{FM}$  enthält auch den Aufwand

---

16) Die Direktchlorierung von Ethylen mit Chlor wird vermindert und die Oxychlorierung mit HCl erweitert (vgl. Bilder 9 und 10).

für die Chlor-Gewinnung aus der Kochsalzelektrolyse. Die Materialherstellenergie  $E_{FM}$  kann aufgespalten werden in:

$$E_{FM} = E_{FCl_2} + E_{FVC/PVC} \quad (64)$$

Der in die Verbrennung verbrachte Anteil der Frischproduktion ist  $\alpha_{RV}$ . Davon wird ein Teil  $\alpha'_{RV, HCl}$  für die HCl-Rückführung verwendet, der Rest  $\alpha'_{RV, MVA}$  anderweitig z. B. in MVA's verbrannt.

Es wird ein Rückföhrfaktor  $\xi_{HCl}$  definiert:

$$\xi_{HCl} = \frac{\alpha'_{RV, HCl}}{\alpha_{RV}} \quad (65)$$

und entsprechend für den Rest:

$$\xi_{MVA} = 1 - \xi_{HCl} = \frac{\alpha'_{RV, MVA}}{\alpha_{RV}} \quad (66)$$

Der **Energieaufwand für die auf dem Verbrennungsweg zur HCl-Gewinnung rezyklierte PVC-Menge** ist damit:

$$E_{HCl}^V = \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl} \cdot E_{RHCl} \quad (67)$$

Als Anteil für die **frisch zu produzierende Chlormenge** bleibt  $(1 - \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl})$  und der zugehörige **Energieaufwand** ist:

$$E_{Cl_2}^F = \left( 1 - \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl} \right) \cdot E_{FCl_2} \quad (68)$$

Die Materialherstellenergie  $E_{FM, HCl}$  ist jetzt die Summe von beiden Pfaden Gl. (67) mit Gl. (63) und Gl. (68) plus dem Energieaufwand für die VC/PVC Herstellung:

$$E_{FM, HCl} = E_{HCl}^V + E_{Cl_2}^F + E_{FVC/PVC} \quad (69)$$

oder:

$$E_{FM, HCl} = E_{FM} \pm \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl} \cdot E_{ZHCl/VC} \quad (70)$$

## Energiebedarf

Der Energieaufwand für die HCl-Erzeugung durch teilweise Verbrennung des PVC's unterscheidet sich von der reinen Frischproduktion um:

$$\Delta E_{FM, HCl} = \pm \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl} \cdot E_{ZHCl} \quad (71)$$

Der Energieäquivalenzwert, Gl. (55), wird um diesen Anteil ergänzt. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} E_{RHCl}^{PV, n} &= n \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A \right) \left( E_{FD} \pm \alpha_{RV} \cdot \xi_{HCl} \cdot E_{ZHCl} \right) \\ &+ n \cdot \left( \frac{n-1}{n} \alpha_A E_R + \left( 1 + \frac{n-1}{n} \beta \right) E_{FP} \right) \\ &+ n \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A \right) \left( 1 - \alpha_{RV} \right) E_F^V \end{aligned} \quad (72)$$

Mit den Abkürzungen  $\alpha_{A, n}$ , Gl. (23), und  $\beta_n$ , Gl. (37), sowie Gl. (71) wird Gl. (72) übersichtlicher:

$$\begin{aligned} E_{RHCl}^{PV, n} &= n \cdot \left( 1 - \alpha_{A, n} \right) \left( E_{FD} \pm \Delta E_{FM, HCl} + \left( 1 - \alpha_{RV} \right) \cdot E_F^V \right) \\ &+ n \cdot \left( \alpha_{A, n} \cdot E_R + \left( 1 + \beta_n \right) E_{FP} \right) \end{aligned} \quad (73)$$

Drei Fälle sollen betrachtet werden:

1. Die zur HCl-Rückgewinnung notwendige Energie ist mit 15 MJ/kg so groß wie die zur Frischproduktion benötigte. Es ist  $E_Z = 0$ . Von den 18 MJ/kg Verbrennungsenthalpie werden 15 MJ/kg für die HCl-Erzeugung verwendet. 3 MJ/kg bleiben für anderweitige Ersetzung von Primärenergie übrig. Dies ist der in Tabelle 5 wiedergegebene Fall "mit Verbrennung, ohne Recycling".
2. Die HCl-Erzeugung im Recyclingpfad erfordert 18 MJ/kg.

Mit  $E_{FHCl} = 15 \text{ MJ/kg}$  und  $E_F^V = 18 \text{ MJ/kg}$  ist  $E_Z = 3 \text{ MJ/kg}$ .

Die Verbrennungswärme von PVC reicht gerade aus, um die Spezialanlage zu betreiben (es wird nur PVC verbrannt). Gegenüber der Frischproduktion werden 3 MJ/kg mehr Herstellenergie benötigt.

3. Es werde eine PVC-reiche Kunststofffraktion verbrannt, die zu 50 % aus PE und zu 50 % aus PVC besteht. Die Anlage benötige genau diesen Heizwert zur HCl-Erzeugung.

Mit  $E_F^V = 30,5 \text{ MJ/kg}$  ist  $E_Z = 15,5 \text{ MJ/kg}$ .

Die Ergebnisse für die beiden Fälle mit unterschiedlich hoher Zusatzenergie  $E_Z$  sind in **Tabelle 12** wiedergegeben. In der Zeile mit der Materialherstellenergie  $E_Z + E_{FD}$  ist die erste Zahl die für  $E_Z = 3 \text{ MJ/kg}$  und die zweite die für  $E_Z = 15,5 \text{ MJ/kg}$ , entsprechendes gilt für die weiteren Zeilen.

Der Vergleich wird angestellt für zwei Materialrecyclingquoten  $\alpha_{A,n} = 0,16$  und  $\alpha_{A,n} = 0,64$  sowie gleiche Verbrennungsquoten  $\alpha_{RV} = 0,16$  und  $\alpha_{RV} = 0,64$ . Außerdem sind Werte für den Fall der Kombination von Materialrecycling und HCl-Recycling angegeben, wenn 10 % der Reststoffe ohne Behandlung direkt deponiert werden.

Die hier angenommene **Zusatzenergie zur HCl-Erzeugung** im Recyclingpfad gegenüber der zur Frischproduktion benötigten **führt zu verringerten Einspar-effekten**. Gegenüber den Werten von Tabelle 4 sind die **Energieäquivalenzwerte größer**, die CO<sub>2</sub>-Produktion ist durch die Zusatzenergie effektiv vergrößert.

**Da bei HCl-Recycling EDC, VC und Roh-PVC erneut hergestellt werden müssen, ergibt sich durch die Verbrennung kein Energiegewinn, obwohl die Verbrennungsenthalpie genutzt wird!**

Gegenüber dem Materialrecycling ist das HCl-Recycling bei hohen Recyclingquoten deutlich unterlegen: Ressourcenstreckungsfaktor **2,1** bei **Materialrecycling** zu **1 – 1,2** bei **HCl-Recycling** (in der Zeile Ressourcenstreckung in Tabelle 12).

Bei der Deponiestreckung ist im Vergleich zur Verbrennung mit HCl-Neutralisierung, vgl. Tabelle 5, zu beachten, daß die zur Neutralisierung notwendigen Stoffe im Prinzip entfallen.

Jedoch erfordert der gewählte Verbrennungsprozeß zusätzlich:

- 5 % Braunkohlenstaub zur Reaktionsbeschleunigung
- 10 % Sand zur Verbesserung der Schlackebildung.

**Tabelle 12:** Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung sowie HCl-Recycling, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und CO<sub>2</sub>-Minderung bei PVC ( $\varepsilon = 1$ ,  $\xi = 1$ )

HCl Recycling $f = 0,3$ , $\alpha_E = 0,14$	$E_Z = 3 \text{ MJ/kg}$ $= 15,5 \text{ MJ/kg}$	Wichtung	ohne Verbrennung, ohne Recycling		ohne Verbrennung, mit Material- Recycling		mit Verbrennung, mit HCl-Recycling		mit Verbrennung, mit Material- und HCl-Recycling	
			$\alpha_{RV} = 0,16$	$\alpha_{RV} = 0,64$	$\alpha_{RV} = 0,88$ $\alpha_A = 0,2$ $n = 5$	$\alpha_{RV} = 0,72$ $\alpha_A = 0,8$ $n = 5$				
$E_Z: \left(1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A\right) \cdot \alpha_{RV} +$		0,09 0,44		$\alpha_A = 0,2$ $n = 5$	$\alpha_A = 0,8$ $n = 5$					
$E_{FD}: \left(1 - \frac{n-1}{n} (1 - \alpha_E) \alpha_A\right)$		1	1	0,86	0,45	1,01 1,07	1,06 1,28	0,93 1,19	0,47 0,56	
$E_{FP}: \left(1 + \frac{n-1}{n} \beta\right)$		0,14	0,14	0,16	0,16	0,14	0,14	0,16	0,16	
$E_F^V: \left(1 - \frac{n-1}{n} \alpha_A\right) (1 - \alpha_{RV} \cdot \varepsilon)$		0,51	0,51	0,43	0,18	0,43	0,18	0,05	0,05	
$\Sigma$ Energieaufwendungen normiert auf $[n \cdot E_{FD}]$			1,64	1,45	0,79	1,58 1,64	1,38 1,6	1,14 1,4	0,68 0,77	
Einsparung in % bezogen auf "ohne Verbrennung, ohne Recycling"				12 %	52 %	4 % 0 %	16 % 2 %	30 % 15 %	59 % 53 %	
Energieäquivalenzwert [MJ/kg] zur Produktherstellung und Beseitigung $[E_{FD} = 35 \text{ MJ/kg}]$			58	51	28	55 58	48 56	40 49	24 27	
Ressourcenstreckung: $S_E$				1,1	2,1	1 1	1,2 1	1,4 1,2	2,4 2,1	
Deponiestreckung: $S_D$				1,2	2,8	1,1	1,8	3,1	5,6	
CO <sub>2</sub> - Minderung (-) - Vermehrung (+)		absolut, normiert auf $[n \cdot E_{FD}]$ : in Prozent :		- 0,12 - 11 %	- 0,53 - 46 %	0,01 / 0,07 1 % / 6 %	0,06 / 0,28 5 % / 25 %	-0,05 / +0,21 - 4 % / + 18 %	- 0,51 / - 0,42 - 45 % / - 37 %	

Aus 250 kt/a PVC-Abfällen sollen so 90 kt/a HCl sowie 54 kt/a mineralisierte Schlacke und 20 kt/a Filterstäube erzeugt werden. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von Reststoffen zum PVC-Einsatz von  $f = 0,3$ , das die Deponiestreckung bestimmt.

**Fazit:**

*HCl-Recycling führt in der hier durchgeführten Betrachtung nicht zu Vorteilen gegenüber dem Materialrecycling.*

*Auf der Emissionsseite ist dieser Pfad darüber hinaus von Nachteil.*

#### 4.4 Technische Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling

Obige Ausführungen zeigen einen Teil der Komplexität, die sich hinter dem Sammelbegriff "PVC" verbirgt. Daraus lassen sich bereits qualitativ technische Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Materialrecyclings formulieren:

- Um den Energieaufwand für Kreislaufprozesse beim PVC-Recycling kleiner als bei der Frischproduktion zu halten, müssen diese Prozesse möglichst so geführt werden, daß der hohe Energieaufwand für die Roh-PVC-Erzeugung wieder voll genutzt und für die Herstellung des produktspezifischen PVC-Vielstoffgemisches nicht erneut aufgewendet werden muß (vgl. Bild 10). Dies erfordert ein produktbezogenes Materialrecycling der jeweiligen PVC-Vielstoffgemische. Der hierfür erforderliche Energieaufwand beträgt lediglich 10 % der im Roh-PVC enthaltenen Gesamtenergie, außerdem nimmt er mit zunehmender Produktlebensdauer in bezug auf den Produktnutzen relativ ab. Eine Auftrennung der PVC-Molekülketten in die Grundbestandteile (Öl, HCl, Chlor) hinunter auf die Stoffebene und ein Neuaufbau von Roh-PVC und PVC-Produkten würde viel zu große Energiemengen erfordern und damit den Kreislaufprozeß von vornherein unwirtschaftlich und umweltbelastend gestalten.
- Es ist praktisch nicht möglich, wieder eine Trennung der PVC-Vielstoffgemische in Roh-PVC und Additive vorzunehmen, weil die Additive in der Molekülstruktur fest eingebunden sind. Das bedeutet, daß nur sortenreine bzw. weitgehend sortenreine PVC-Vielstoffgemische in den Kreislauf Konsumption / Produktion auf der Produktebene zurückgeführt werden können. Die

Rezyklate werden gemeinsam mit einem Anteil Frischware verarbeitet (gewisse Bandbreiten in den Rezepturen können teilweise toleriert werden).

- Sortenreine PVC-Vielstoffgemische fallen schon immer als Ausschuß und Verschnitt bei der Produktion und der Verarbeitung an, und sie werden in der Regel ohne Probleme und selbstverständlich in den Kreislauf zurückgeführt. Dieser etablierte Kreislauf für neue, nicht gebrauchte Ware muß nun erweitert werden auf den Kreislauf für sortenreine gebrauchte Ware zur Erzeugung der gleichen Produkte: aus gebrauchten Fenstern werden neue Recycling-Fenster, aus gebrauchten Rohren werden neue Recycling-Rohre usw.
- Aus vermischten Kunststoffen mit PVC-Anteilen und aus Mischungen unterschiedlicher PVC-Vielstoffgemische können nur minderwertige Produkte erzeugt werden, für die es in aller Regel keine echte Nachfrage gibt. Gelegentlich gibt es künstliche Nachfragen, die durch Subventionen erzeugt werden. Teilweise bilden die aus Kunststoffmischungen erzeugten minderwertigen Produkte nur Zwischenlager auf dem Weg zur endgültigen Beseitigung.
- Für den nicht rezyklierbaren großen Anteil an PVC-Material ist Deponieentlastung vorgeschrieben bzw. wünschenswert. Als Maßnahmen kommen Produktverzicht / Produktsubstitution und Verbrennung in Frage. Kriterien der Substitution in bezug auf Deponieentlastung durch Verwendung alternativer Materialien sind u. a. bessere Rezyklierbarkeit, umweltfreundlichere Verbrennung und / oder umweltverträglichere Deponierung dieser Materialien.

Verbrennung PVC-reicher Kunststofffraktionen führt zu großem HCl-Anfall. Der Wiedereinsatz von Chlorwasserstoff in der PVC-Produktion wäre energetisch dann lohnend, wenn die Zusatzenergie gegenüber der Frischproduktion von Chlor erheblich kleiner wäre. Das trifft jedoch offensichtlich nicht zu!

Auf der Schadstoffseite ist die Bilanz zwischen Frischproduktion (in der BRD insbesondere Quecksilberemissionen bei der Elektrolyse) und Recyclingproduktion (mit Dioxin-Problem und Schwermetallemissionen bei der Verbrennung) zu machen und diese zu bewerten.

## 5. Recyclingstrategien für PVC-Produkte

Das Interesse an der Wiederverwertung kann verschiedener Natur sein:

### a) Recyclingaktivitäten als absatzförderndes Argument

Der Begriff Recycling wird aufgegriffen, weil er modern und aktuell ist, weil er positiv besetzt ist und weil er so den Absatz der Produkte fördern kann. In Broschüren, Zeitungsanzeigen, Rundfunk und Fernsehen wird mit dem Begriff Recycling Werbung betrieben, manchmal auch unseriöse Werbung. Diese Werbung wird teilweise durch experimentelle Untersuchungen, Pilotprojekte u. ä. unterstützt. Das Hauptziel bei dieser Art von Recyclingaktivitäten ist die Sicherung bzw. Steigerung der Neuproduktion. Stoff- und Energieeinsparung sind keine primären Ziele.

### b) Recyclingaktivitäten im Sinne einer Produktverantwortung

Hier ist das Hauptziel die möglichst weitgehende Schaffung von Produktions-/ Konsumtionskreisläufen im Sinne einer echten Produktverantwortung. Die Einsparung von Rohstoffen und Energie und damit die Verringerung der Umweltbelastung steht dabei im Vordergrund, außerdem die Wirtschaftlichkeit der Recyclingmaßnahmen im gesamten Kreislauf. Hierfür sind Strukturhemmnisse zugunsten des Recyclings zu beseitigen (z. B. in DIN-Normen).

Das gespielte Scheininteresse und Scheinaktivitäten sollen an dieser Stelle nicht weiter verfolgt werden. Welche Voraussetzungen müssen nun aber für echte Recyclingaktivitäten erfüllt sein?

### 5.1 Gesamtnutzungszeitraum und zeitabhängige Vorgänge

Bei den Betrachtungen von Recyclingstrategien muß ein geeigneter zeitlicher Bezugsrahmen für diese Ziele festgelegt werden, um einen Maßstab für die

- an die Umwelt abgegebenen Stoffmengen sowie
- den Nutzen des Recyclings im Vergleich zur reinen Frischproduktion

gewinnen zu können.

Je nach betrachtetem Produkt und der damit zu erbringenden Dienstleistung (dem Nutzen) sind die Nutzungszahlen sowie die Nutzungsdauer zu definieren bzw. zu wählen. Sie ergeben sich allerdings erst im Zusammenhang mit einer spezifischen Fragestellung.

### 5.1.1 Produktebene

- a) Jedes Produkt hat eine bestimmte Haltbarkeitsdauer, nach deren Ablauf das Produkt nicht mehr nutzbar ist bzw. ausgesondert wird, weil es
- zerbröselt (verrostet, verdorben ...),
  - aus der Mode oder
  - technisch veraltet (überholt ...)

ist.

Die Haltbarkeitsdauer wird als unabhängig von der Anzahl der Nutzungen betrachtet (was strenggenommen selten stimmt).

- b) Jedes Produkt kann gewöhnlich eine gewisse Anzahl von Dienstleistungen erbringen bzw. mit einer mittleren Häufigkeit genutzt werden, bevor es unbrauchbar wird.

Die Anzahl der Nutzungen wird von der Zeit unabhängig angenommen (was strenggenommen ebenfalls selten stimmt).

Für ein Produkt bzw. eine Dienstleistung wird ein *Gesamtnutzungszeitraum* ("Produktlebensdauer") festgelegt, in dem das Produkt *genutzt wird oder genutzt werden kann*.

Dem Nutzungszeitraum voraus gehen die Rohstoffversorgung, die Herstellung/Verarbeitung, danach folgt die Entsorgung mit evtl. Rückführung von Stoffen auf dem Recyclingpfad, sowie die Behandlung und endgültige Deponierung von Reststoffen. Die Nutzungszeiten sind gewöhnlich groß gegenüber den Ver- und Entsorgungszeiten (Ausnahme: Verpackungen). *Zeitliche Betrachtungen werden deshalb auf die Nutzungszeit begrenzt*.

Schadstoffabgaben an die Umwelt erfolgen in allen vier Phasen. Sie können für Bilanzierungszwecke dem Nutzungszeitraum zugeordnet werden.

Für die aufgrund der Wirkungen von (Schad)Stoffabgaben an die Umwelt hervorgerufenen Umweltschäden / (-belastungen) können längere Betrachtungszeiträume notwendig werden, die die Vorhersehbarkeit überschreiten.

Damit werden belastbare Bilanzierungen unmöglich.

Diesem Dilemma läßt sich nur vorsorglich begegnen, indem möglichst wenig anthropogen erzeugte (neue) Stoffe frei an die Umwelt abgegeben werden.

Werden die Produkte endgültig deponiert oder wird die Form aufgelöst, **so endet der Produktnutzungszeitraum:**

- a) Nutzungen müssen innerhalb der Haltbarkeitsdauer möglichst gleichmäßig stattfinden, wenn die durch das Produkt mögliche Anzahl der Nutzungen maximal ausgeschöpft werden soll.

Die maximale Nutzungszeit(dauer) ist gleich der Haltbarkeitsdauer.

Die zugehörige Ausschöpfungsrate  $a_{max}$  zur Ausnutzung dieser Zeitspanne ist:

$$a_{max} = \frac{\text{maximale Nutzungszahl}}{\text{Haltbarkeitsdauer}}$$

- b) Ist die Anzahl der Nutzungen unbegrenzt, dann ist die maximale Nutzungszeitdauer ebenfalls gleich der Haltbarkeitsdauer, jedoch bei beliebig hoher Ausschöpfungsrate.
- c) Erfolgen bei begrenzter Nutzungszahl alle Nutzungen in kürzerer Zeit als der Haltbarkeitsdauer, dann ist die Nutzungszeit kleiner als die Haltbarkeitszeit.

Die Nutzungszeitdauer von Produkten  $T_P$  wird auch als Lebensdauer von Produkten bezeichnet. Unter Langlebigkeit wird eine möglichst lange Gesamtnutzungszeit verstanden.

Recycling auf der Produktebene ist bei vielen Produkten schon so lange gängige Praxis, daß dies als "Recycling" nicht besonders wahrgenommen wird (z. B. Geschirr spülen, Kleidung waschen und erneut tragen). Die Produktlebensdauer enthält diese Recyclingvorgänge, ohne daß besonders in Nutzungszahl  $m$  und Einzelnutzungslebenszeit  $t_m$  unterschieden würde. Im Prinzip ist das möglich, wobei noch zwischen der direkten Einzelnutzungszeit  $t_{md}$  und der Ruhezeit  $t_{mr}$  unterschieden werden sollte.

$$T_P = \sum_{i=1}^m t_i$$

$$t_i = t_{id} + t_{ir}$$

Sind die Einzelnutzungszeiten  $t_i$  gleich lang:  $t_i = t_m$  gilt:

$$T_P = m \cdot t_m$$

Erfüllen Produkte, wie häufig der Fall, gleichzeitig mehrere Funktionen, so ist eine detailliertere Aufteilung notwendig<sup>17)</sup>.

### 5.1.2 Bauteilebene / Komponenten

Bauteile / Komponenten in Produkten können eine andere Lebensdauer als das gesamte Produkt haben. Wird die Formaflösung bis zur Bauteilebene vorgenommen, so ist zwar der Produktnutzungszeitraum beendet, die Bauteilnutzungszeit kann aber länger sein.

$$\mathbf{T}_B = \sum_{i=1}^n \mathbf{t}_{iB}$$

$$\mathbf{T}_B = \mathbf{n}_B \cdot \mathbf{t}_{nB}$$

### 5.1.3 Materialebene

Werden Produkte/Bauteile/Komponenten in ihre Materialbestandteile zerlegt, so endet die übergeordnete Nutzungsdauer, die Materialnutzungszeit kann wiederum länger sein, wenn das Material erneut benutzt wird:

$$\mathbf{T}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{t}_{in}$$

und mit  $\mathbf{t}_{in} = \mathbf{t}_{nn}$ :

$$\mathbf{T}_n = \mathbf{n} \cdot \mathbf{t}_{nn}$$

wobei  $\mathbf{t}_{nn}$  eine Produktnutzungszeit  $\mathbf{T}_P$  sein kann, bevor das Material rezykliert wird.

Das Optimum ergibt sich demnach nicht unbedingt nur aus einer möglichst langen Nutzungszeit vor dem Materialrecyclingvorgang, sondern aus der umweltgünstigsten Kombination der Anzahl der Nutzungen  $\mathbf{m}_x$ , Recyclingvorgänge  $\mathbf{n}_x$  und Nutzungszeiten  $\mathbf{t}_x$ .

---

17) Das Öffnen und Schließen des Fensters sei eine Nutzung. Das Offenhalten (Lüften) eine weitere. Die Zeit zwischen Öffnen und Schließen könnte als Einzelnutzungszeit  $\mathbf{t}_{id}$  definiert werden. Nach dem Schließen erfolgt eine Ruhezeit  $\mathbf{t}_{ir}$ . In dieser "Ruhezeit" werden hingegen die Licht- und Klimafunktionen des Fensters genutzt. Für sie gelten Nutzungszeiten, die durch die Glas-Rahmen- und Dichtungslebensdauern bestimmt sind. Diese Funktionen werden "nur" einmal genutzt. Wo der lebensdauerdefinierende bzw. begrenzende Faktor liegt, muß im Einzelnen untersucht und je nach Fragestellung festgelegt werden.

### 5.1.4 Rohstoffebene

Entsprechendes gilt für Rohstoffe.

$$\mathbf{T}_R = \sum_{i=1}^n \mathbf{t}_{iR}$$

und mit  $\mathbf{t}_{iR} = \mathbf{t}_{nR}$ :

$$\mathbf{T}_R = \mathbf{n}_R \cdot \mathbf{t}_{nR}$$

**Recycling auf der Rohstoffebene kommt für Kunststoffe kaum in Betracht.**

## 5.2 Stoff-, Energie- und Geldströme

Vorrangige Ziele sind die Absenkung der Stoff- und Energieströme insbesondere aus nichtregenerativen Quellen und der mit dem Stoffeinsatz verbundenen Emissionen.

Die Geldströme<sup>18)</sup> sollen dazu so gelenkt werden, daß

- der Einsatz von frischen Rohstoffen teurer wird, wenn gleichzeitig auch Sekundärrohstoffe zur Verfügung stehen (Rohstoffsteuer);
- der Energieeinsatz für Frischwarenproduktion mit Primärrohstoffen gegenüber dem Einsatz für Produkte aus **Materialrecycling** teurer wird (spezifische Energiesteuer);
- die Umweltentlastung durch die Vermeidung sowohl der ubiquitären Verteilung als auch durch die Verringerung der an die Umwelt abgegebenen Stoffmengen und deren Bioverfügbarkeit erreicht wird (spezifische Umweltabgaben);
- Arbeitsplätze, die durch das relative Absinken der Produktion mit frischen Rohstoffen verloren gehen, durch solche im Recyclingsektor, im Handel mit Alt-Produkten und in der Sekundärrohstoff- und -materialwirtschaft kompensiert werden (integrierte Arbeitsmarktpolitik).

Es ist jeweils zu untersuchen, ob für ein gewünschtes umweltfreundliches Verhalten tatsächlich Geld verfügbar ist bzw. wie es verfügbar gemacht werden kann.

## 5.3 Recyclingformen

Die Recyclingformen *Wiederverwendung der PVC-Produkte* für den gleichen Zweck und *Weiterverwendung* für einen anderen Zweck müssen *erste Priorität*

---

18) Die dazu notwendigen thematischen Arbeiten sind in Vorbereitung.

haben. Die Produkte müssen langlebig, montage- und reparaturfreundlich konstruiert werden und möglichst lange im Handel bleiben <sup>19)</sup>.

Dadurch wird die Produktlebensdauer vergrößert und der Einsatz von Neuprodukten entsprechend reduziert. Dies bedeutet eine Verringerung des oftmals erheblichen Rohstoff- und Energieeinsatzes sowie der damit verbundenen Schadstoffbelastungen der Umwelt in der Neuproduktion. Folglich verringert sich auch die Produktabfallmenge aus der Gebrauchsphase.

Im Vergleich zum Einsatz mehrerer Neuprodukte mit kürzerer Lebensdauer bei vorgegebenem gleichen Gesamtnutzungszeitraum steigen die Aufwendungen für Energie und Hilfsstoffe in der Gebrauchsphase an, ebenso die mit diesen Aufwendungen verbundenen Schadstoffabgaben (z. B. durch Waschen).

Belastbare Aussagen zum Stoff- und Energieverbrauch können nur gewonnen werden, wenn sie auf dem Stoffkreislauf bzw. dem gesamten Produktlebensweg fußen.

Die Recyclingform von *zweiter Priorität* muß in der Regel die *Wiederverwertung in dem bereits durchlaufenen Produktionsprozeß* sein. Für PVC bedeutet dies die *erneute Herstellung von PVC-Granulat bzw. -Pulver* aus sortenreinen Produktionsabfällen bzw. sortenreinen Altprodukten (Beispiel: Fenster). Dieses Granulat könnte zusammen mit Neugranulat eingeschmolzen und wieder zu einem vollwertigen Produkt verarbeitet werden. Die Farb- und Oberflächenqualitäten würden jedoch im allgemeinen nicht so gut sein, wie bei reiner Frischware.

Deshalb werden die sichtbaren Flächen bzw. die Nutzflächen aus Frischware und die verborgenen bzw. tiefer liegenden Volumina aus Rezyklat hergestellt. Dazu werden gemeinsame, aber parallele Ausbringungsverfahren für Frischware und Rezyklat angewendet.

Durch den notwendigen Anteil Frischware ist die Recyclingquote begrenzt.

---

19) Im Unterschied dazu sind Produkte anders zu betrachten, wenn mit ihrem Gebrauch ein Stoff- und Energieeinsatz verbunden ist.

Auch hier kommt es auf die Minimierung des über alle Phasen kumulierten Energie- und Stoffverbrauchs sowie der Schadstoffemissionen während des gesamten Produktzyklus an.

Jedoch kann dazu der Ersatz von noch gebrauchsfähigen Produkten durch neue mit gesteigerter Stoff- und Energieverbrauchseffizienz eine bessere Lösung sein, als die Langlebigkeit bzw. lange Verwendung (z. B. *Waschmaschinen, Kühlaggregate*).

Sollte es möglich sein, in einem solchen Einsatzbereich höhere Anteile zurückzuführen, als in der Produktion benötigt, so gibt es dafür nur Verwertungsmöglichkeiten, wenn die Gesamtproduktion weiter wächst.

Im jedem Fall ist eine Sammel- und Rücklauflogistik mit Gewährleistung der Sortenreinheit erforderlich. Wie groß das Potential für diese Recyclingform ist, wird im weiteren untersucht.

Nicht sortenreine, vermischte und verschmutzte PVC-Abfälle (z. B. im Hausmüll) können nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten aufbereitet werden, das erzeugte Mischgranulat ist minderwertig, die im Schmelzprozeß erzeugten Produkte (Bänke, Pfähle, Zäune) sind teilweise subventionierte Zwischenlager auf dem Weg zur endgültigen Entsorgung. Es gibt kaum einen echten Bedarf für solche Produkte und damit keinen Markt. Derartige PVC-Abfälle sind somit für die Recyclingform Wiederverwertung ungeeignet.

Die Recyclingform von *dritter* und letzter *Priorität* ist die *Weiterverwertung* von solchen PVC-Altprodukten bzw. Abfällen, die nicht mehr wiederverwertet werden können. In einem ganz anderen Produktionsprozeß (z. B. durch Hydrierung) werden die *Molekülketten des PVC chemisch aufgebrochen* und in ihre Grundbestandteile zerlegt. Die Wirtschaftlichkeit von geeigneten Trennverfahren ist ein besonderes Problem.

#### 5.4 Integriertes, materialorientiertes und produktgruppenbezogenes Recyclingkonzept

Firmenpolitische Entscheidungen zur Schaffung eines integrierten materialorientierten und produktgruppenbezogenen Recyclingkonzeptes wurden z. T. schon getroffen. Sie umfassen die in der Produktlinie produzierenden Unternehmen z. T. auch die rezyklierenden Unternehmen. Eine Lücke klafft bei der Entsorgung (außer bei Fenstern). Wichtige Kriterien eines solchen Konzeptes sind:

Für jedes PVC-Produkt bzw. jede Produktgruppe (z. B. Fensterprofile) ist ein speziell entwickeltes PVC-Vielstoffgemisch erforderlich, bestimmte Bandbreiten der Rezepturen sind bei einigen Produkten tolerierbar. Interesse an der Wiederverwertung solcher speziellen PVC-Vielstoffgemische können ausschließlich Erzeuger des Vielstoffgemisches (Granulat, Pulver), die Erzeuger von Halbzeugen (z. B. Fensterprofile) und die Verarbeiter der Halbzeuge (z. B. Fensterbauer) haben. (In

diesem Beispiel wären es also alle an dem Produkt PVC-Fenster beteiligten Firmen.)

Folgende Grundsätze erscheinen angemessen:

### 1. Materialrecycling

- Recycling des PVC-Materials erfolgt produktgruppenbezogen und firmenübergreifend sowohl in der Breite (verschiedene Hersteller in der gleichen Produktstufe) als auch in der Linie (Hersteller / Verarbeiter in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus des Produktes).
- Zentrale Verantwortlichkeit in jedem Unternehmen für die Entwicklung und Umsetzung des integrierten Recyclingkonzeptes.
- Einsparung von Rohstoffen und Energie während einer zugrundegelegten Gesamtnutzungsdauer im Vergleich zur Nutzung von Frischprodukten (Öko-Bilanz).
- Preispolitik für Neuware und Recyclingware; die Recyclingprodukte müssen marktfähig gemacht werden durch Gewährleistung von Funktion und Qualität, Information des Kunden und Preisanreize.
- Gemeinsam abgestimmte Logistik bei den beteiligten Unternehmen. Hersteller- / Verarbeiterverantwortlichkeit für die Materialrückführung.
- Recyclingfreundliches Produktdesign.
- Recyclingfreundliche Materialentwicklung.
- Abgleich der Rezepturen des PVC-Vielstoffgemisches eines Produktes bzw. einer Produktgruppe.

### 2. Reststoffverwertung unter Hersteller- / Verarbeiterverantwortung

Die Reststoffe aus der Produktanwendung und dem Materialrecycling müssen wieder- / weiterverwertet werden. Dazu ist ein schlüssiges Konzept zu erstellen, das zu den Recyclingzielen paßt:

- die Recyclingaktivitäten sind produktorientiert und firmenübergreifend;
- der Recyclingkreislauf ist Teil der Produktionslogistik und
- die Hersteller / Verarbeiter organisieren und finanzieren den Recyclingkreis. Sie schaffen dazu geeignete Organisationsstrukturen.

## **5.5 Zwischenbilanz**

Die grundsätzlichen Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling führen zu folgender Zwischenbilanz:

1. Nur mit sortenreinen PVC-Vielstoffgemischen (Halbzeuge, Neu-Produkte, Alt-Produkte) ist ein energetisch und ökonomisch sinnvoller Recyclingprozeß möglich.
2. Die Recyclingprozesse können nur produktbezogen ablaufen.
3. Von allen in der Produktlinie beteiligten Firmen muß ein gemeinsam akzeptiertes integriertes Recyclingkonzept entwickelt und umgesetzt werden, denn nur diese Firmen können ein echtes Interesse am optimalen Recycling ihres Produktes entwickeln und die Produktverantwortung übernehmen.
4. Es werden damit keine allgemein gültigen Aussagen zum PVC-Recycling, sondern nur Aussagen zu einem produktbezogenen PVC-Recycling möglich sein.

## 6. Stand des PVC-Recycling nach Literaturangaben – Größenordnung der PVC-Recyclingmengen

Die PVC-Industrie arbeitet offensiv daran, für ihre Produkte eine möglichst große Wiederverwertbarkeit zu organisieren, um die Umweltbelastung zu verkleinern und den ökologischen Streit in Grenzen zu halten.

Einige Hersteller haben für ihre jeweiligen Produktbereiche damit begonnen, ein Rücknahmesystem für die gebrauchten Produkte zu organisieren.

### *Materialrecycling*

Unter Recycling von PVC soll hier die Rückführung von PVC-Produktionsabfällen, von nicht in Gebrauch genommenen PVC-Produkten und von gebrauchten PVC-Produkten auf der Materialebene in den Produktionsprozeß von jeweils gleichwertigen Produkten verstanden werden. Zu unterscheiden sind also:

1. Fabrikrecycling a) beim Hersteller b) beim Verarbeiter
2. Handelsrecycling (Rückführung nicht verkaufter Produkte aus Lagern und Verkaufsräumen)
3. Verbrauchsrecycling (Hauptmengen der Produktion).

Die Größenordnung der gesamten Recyclingmengen in der alten BRD geht aus Bild 11 und Tabelle 13 hervor. 1987 betrug die PVC-Produktion 1,32 Millionen Tonnen, der Netto-Inlandverbleib betrug 0,9 Mt. Die gesamte Recyclingmenge im Inland wird zu 50 000 Tonnen geschätzt.

**Tabelle 13:** Anfall und Verbleib von PVC-Reststoffen\*) im produzierenden Gewerbe nach Angaben des statistischen Bundesamtes in Tonnen [nach Tötsch/Gaensslen, 1990]

Jahr	Abfallmenge	Externe Entsorgung	Interne	Interne Verbrennung	Recycling
1980	91.062	58.560	7.687	28	24.795
1982	107.407	58.592	13.367	4	35.444
1984	142.384	78.144	12.297	15	51.927

\*) PVC inklusive Hilfsstoffe, Eintrag enthält auch die kleine Menge fluorhaltiger Kunststoffabfälle

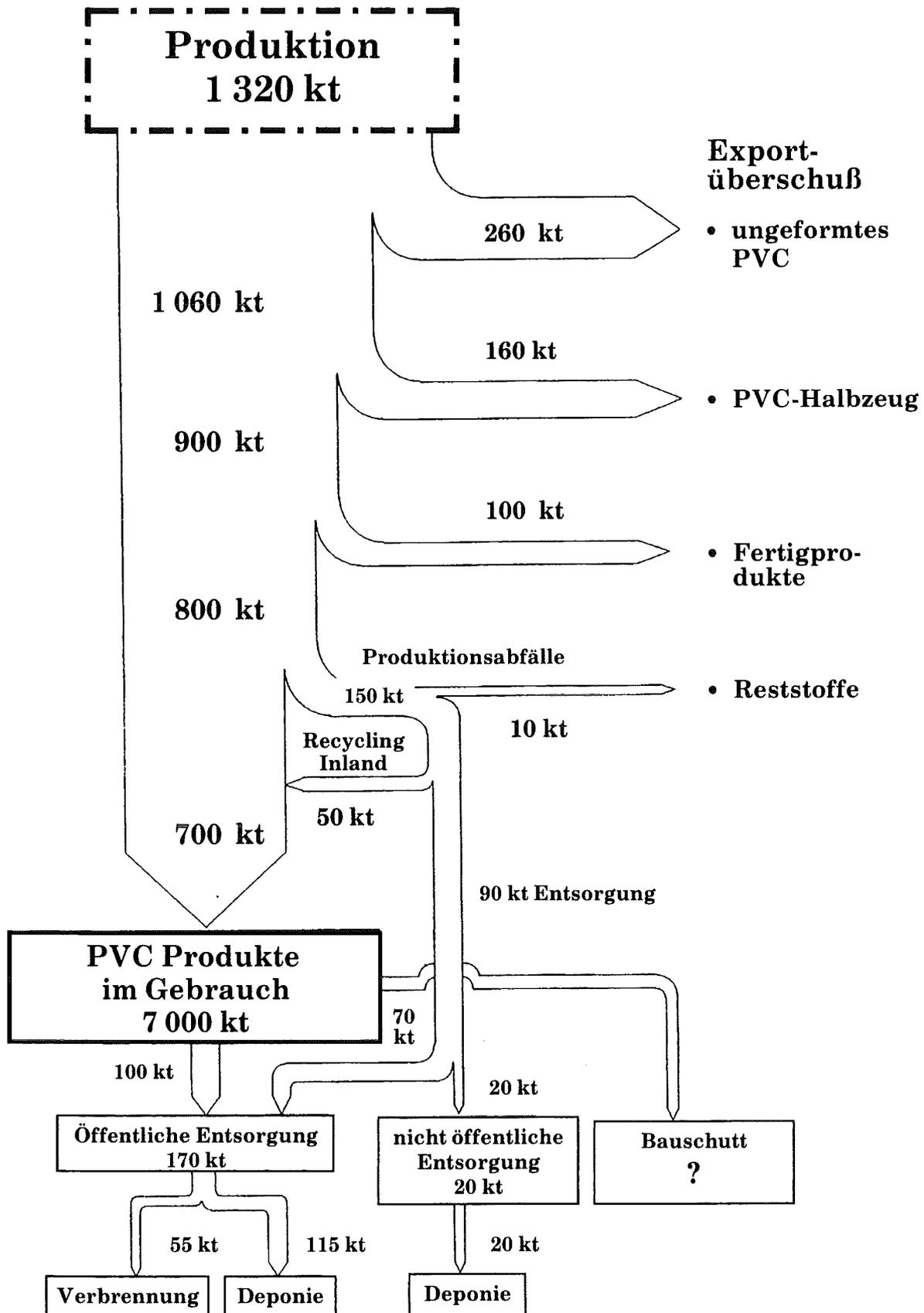


Bild 11: Massenfluß von Polyvinylchlorid 1987 (nach Tötsch/Gaensslen, 1990)

Um einen Überblick über den Stand der PVC-Verwertung zu erhalten, haben (Halbekath und Moser, 1992) 114 Firmen angeschrieben, die von (Tötsch et al., 1990) und der kunststoffverarbeitenden Industrie (GKV, 1992) als PVC-Verwerter angegeben waren. Von 31 Firmen, die das Anfrageschreiben beantworteten, verwerteten 4 kein PVC mehr, weil es unwirtschaftlich sei, 10 hatten noch nie PVC rezykliert. 15 Betriebe nahmen nur sortenreine **Produktionsabfälle** an. 10 machten davon Mengenangaben, die zwischen 40 und 7 000 Tonnen pro Jahr schwanken; insgesamt ergab sich eine Menge von **31 000 Tonnen sortenreiner Produktionsabfälle pro Jahr**. In Tabelle 14 sind die Befragungsergebnisse zusammengestellt. Aus diesen vorliegenden Betriebsangaben kann man eine Rückführmenge von 32 700 Tonnen pro Jahr errechnen, im wesentlichen sind dies Produktionsabfälle.

**Tabelle 14:** PVC-Rückführungsmengen (Halbekath / Moser, 1992)

Anzahl der Betriebe	Antworten	Mengen (PVC in Tonnen pro Jahr)
4	verwerten kein PVC mehr (unwirtschaftlich)	—
10	noch nie PVC verwertet	—
15	sortenreine Produktionsabfälle	31 000
1	gemischte und sortenreine Produktionsabfälle	1 000
2	Gewerbe- und Hausmüllabfälle: PVC-Anteil	700
83	keine Antwort	?
	<b>Gesamtmenge</b>	<b>32 700</b>

Berücksichtigt man, daß bei der Befragung nicht alle Betriebe geantwortet haben, dann dürfte die Größenordnung der im wesentlichen sortenreinen Produktionsabfälle zur Wiederverwertung bei 40 000 – 50 000 Tonnen pro Jahr liegen. Die von Tötsch angegebene Schätzung der Inland-Recyclingmenge für 1987 liegt auch bei 50 000 Tonnen.

Die von der AgPU vorläufig errechneten Recyclingmengen betragen 1993 ca. 97 000 t, verwertete Gewerbeabfälle sind darin enthalten; die im Produktionspro-

zeß wiederverwendeten Produktionsabfälle sind darin nicht enthalten (*Eckstein 1993*).

Es kann an dieser Stelle zunächst einmal festgehalten werden:

- Bei den der Wiederverwertung zugeführten PVC-Recyclingmengen handelt es sich überwiegend um sortenreine Produktionsabfälle.
- Die Mengen liegen in einer Größenordnung von 50 000 – 100 000 Tonnen pro Jahr.
- Bezogen auf die *derzeitige* PVC-Produktion von rund 1,6 Mio Tonnen im Jahr 1990 sind dies 3 – 6 %.
- Die Angaben über Konsumtionsabfälle für das Recycling sind lückenhaft, es handelt sich um sehr kleine Mengen.

Um den Stand des PVC-Recycling in der Praxis und das Recyclingpotential von PVC-Produkten genauer zu erkunden, wurden verschiedene in Betrieb befindliche PVC-Recyclinganlagen besichtigt.

## 7. PVC-Recycling in der Praxis

Es wurden vier Firmen ausgewählt und die dort in Betrieb befindlichen Recyclinganlagen besichtigt<sup>20)</sup>. Die Auswahl der Firmen erfolgte nach dem möglichen Recyclingpotential der dort gefertigten Produkte:

1. Fensterprofile aus PVC, Firma Hüls Troisdorf AG in Troisdorf
2. Rohre aus PVC, Firma Wavin in Hardenberg - Niederlande
3. Fußbodenbeläge aus PVC, Firma AgPR-Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling, AgPR-Recyclinganlage bei Firma Beekmann, Großefehn
4. Folien aus PVC, Firma Höchst AG, Werk Gendorf / Burgkirchen.

Diese Besichtigungen von Recyclinganlagen wurden abgeschlossen mit einer Besichtigung der *Chlor-, VC- und PVC-Produktion* bei der Firma Wacker, Burghausen, jetzt Vinnolit.

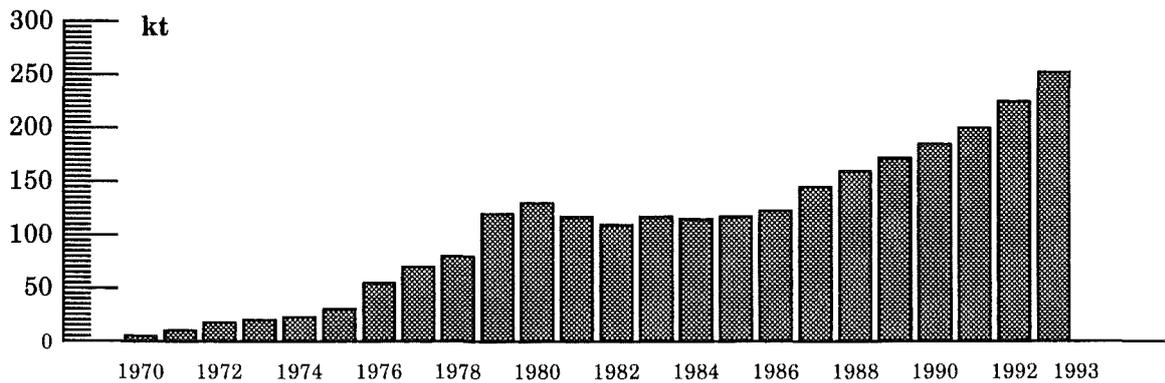
### 7.1 PVC-Fensterprofile

Im September 1992 wurden die Recyclinganlagen der Firma Hüls Troisdorf AG besichtigt und Gespräche im Betrieb Fensterprofile geführt. Die Erkenntnisse, erhaltenen Informationen (siehe auch: *Neumann, 1992*) und experimentellen Befunde sind im folgenden dargestellt:

Im Jahr 1991 wurden für Fensterprofile in den alten Bundesländern 200 000 t PVC eingesetzt (Bild 12 a), in ganz Deutschland etwa 230 000 t. Etwa  $\frac{1}{3}$  der daraus hergestellten Fenster bzw. Profile werden exportiert, so daß ca. 150 000 t PVC entsprechend etwa 7,6 Mio Fenstereinheiten in Deutschland verbleiben. Pro Fenstereinheit ergibt das etwa 20 kg PVC (*Engelmann, 1992*). An anderer Stelle spricht die AgPU von 4 – 5 Millionen eingebauten und montierten Fenstern (*AgPU, 1992*).

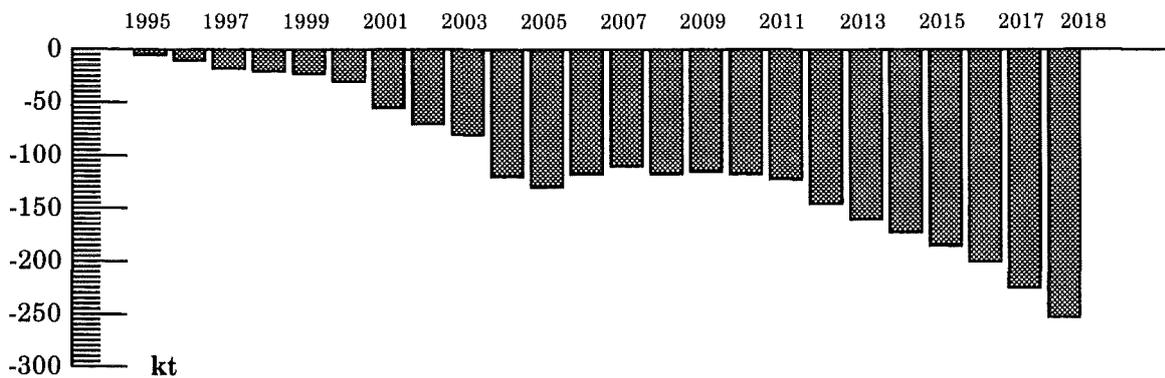
---

20) Ende Juli 1992 begannen wir mit der Kontaktaufnahme zur Ermöglichung von Besichtigungen der laufenden Recycling-Verfahren von PVC über Dr. Tötsch bei der Firma Hüls AG. Er hat uns mit DI Schadhauser bekannt gemacht, der bei der Wacker Burghausen für "PVC-Recycling und Umwelt" zuständig ist, und gleichzeitig den Arbeitskreis PVC-Recycling in der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (AgPU) in Bonn leitet.



**Bild 12 a:** PVC für Fensterprofile – Inlandverbrauch und Export (\* geschätzt)  
[Süddeutsches Kunststoffzentrum, 1992; Schadhauser 1994 b]

Legt man eine mittlere Fensterlebensdauer von 25 Jahren zugrunde, so werden 1995 die im Jahre 1970 produzierten Mengen als Abfall anfallen. In den nächsten Jahren wird die Abfallmenge dann wie die frühere Produktionskurve ansteigen (Bild 12 b).



**Bild 12 b:** Abfallentwicklung bei PVC-Fensterprofilen und 25-jähriger Lebensdauer

### Produktionsabfälle

Die Quellen für das Regenerat sind:

- Produktionsabfälle (Anfahrmaterial, Produktionsausschuß).
- Konfektionsabfälle (Profilabschnitte und -verschnitt beim Fensterbau).

Material von alten, ausgebauten Fenstern wurde bis 1992 nicht eingesetzt, außer für einige Vorversuche.

## *Recycling von gebrauchten Fensterprofilen*

Die Produktionsabfälle entstehen bei der Firma Hüls. Die Konfektionsabfälle der Fensterbauer werden z. B. von der Firma Dekura, Rahden gesammelt, gemahlen und als Mahlgut an die Firma Hüls verkauft. Dieses Mahlgut ist so billig, daß verschiedene Zwischenlager im Betriebsgelände geräumt werden konnten.

Produktions- und Konsumtionsabfälle entstehen in einer Menge von 2 – 5 % der Neuproduktion, also 4 000 – 10 000 t für 1991, mehr gibt es nicht.

### ***Verträglichkeit unterschiedlicher Additive***

Um die Regeneratqualität zu gewährleisten, werden ähnlich wie beim Neumaterial Chargen abgemischt. Bei den einzelnen Anteilen der entstehenden Rezeptur sind bestimmte Streubreiten zulässig, um die Anforderungsprofile zu erfüllen.

Zur *Verträglichkeit alter und neuer Stabilisierungsstoffe* wird mitgeteilt: Bei den in Deutschland in der Vergangenheit verwendeten und heute üblichen Stabilisierungssystemen bei Fenstern treten keine "Unverträglichkeiten" auf. So können z. B. auch cadmiumhaltige Stabilisatoren mit bleihaltigen gemischt werden, und auch eine Nachstabilisierung – beispielsweise auch mit Ca / Zn – ist problemlos möglich.

### ***Altfenster***

Da die Fenster eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren haben, die neuen von 30 – 40 Jahren, werden größere Mengen alter Fenster erst in den nächsten Jahren anfallen. Letztlich wird aber fast die gesamte Produktionsmenge (95 – 98 %) wieder als Ausgangsprodukt für Rezyklate anfallen. Die Fensterhersteller haben in der BRD ein flächendeckendes Rücknahmesystem etabliert (*Eckstein, 1993*). Alte Fenster sollen dezentral verwertet werden (*Engelmann, 1992*).

Gebrauchte Fenster müssen ausgebaut, zerlegt und gereinigt werden. Hierbei ist die Trennung nach Herstellern nicht mehr ohne weiteres möglich. Die Rezyklatanteile werden vermischte PVC-Profilmaterialien aller Hersteller und verschiedener Jahre sein.

### ***Recycling von Altfenstern und Reinheit der Rezyklate***

Die Firma Hoechst hat Versuche mit einem 26 Jahre alten *Altfenster* aus dem Werk Hoechst durchgeführt (*Engelmann, 1992*). Das Fenster wurde ausgebaut, zerlegt und die Profile gemahlen. Aus diesem PVC-Pulver wurden Profile bzw.

Prüfkörper hergestellt, teils unverändert, teils mit Zuschlagstoffen, um die Schlagzähigkeit und die Thermostabilität als wesentliche Qualitätskriterien anzuhoben (vgl. Bild 13 und Bild 14). Es zeigte sich, daß bereits das unveränderte Rezyklat zu hochwertigen Profilen führt. Die zweifellos eingetretene Verwitterung auf der Außenseite der Altfensterprofile erstreckt sich auf einen Bereich von 100 – 200 µm, bei einer Gesamtstärke von 3 – 4 mm. Der Mengenanteil verwitterten PVC's in der Gesamtprofilmenge ist damit sehr klein. Durch die Zugabe der Zuschlagstoffe konnte auch das heute übliche, höhere Niveau an Eigenschaften erreicht werden. Das bedeutet, daß man aus Rezyklaten "bessere" Profile herstellen kann, als 1964 beim Einbau vorlagen.

Die Regenerate müssen metallfrei sein und dürfen keine Fremdkunststoffe enthalten. Der Aufwand beim Recyclingbetrieb ist dazu erheblich. Zur Sicherheit der Profilverhersteller durchlaufen die Abfälle folgende Stufen der Aufbereitung:

- Handsortierung zum Abtrennen von Eisenspänen und Gummidichtungen<sup>21)</sup>,
- manuelle Reinigung verschmutzter Teile,
- Vermahlen von Granulat,
- mechanische Feingutabscheidung: Staub, Sand und Folienreste werden zusammen mit dem Mahlgut verwirbelt und abgesaugt,
- nochmalige automatische Metallabtrennung.

Das Endresultat ist ein hochwertiges Mahlgut, das weitgehend frei von Fremdstoffen und Verschmutzungen ist.

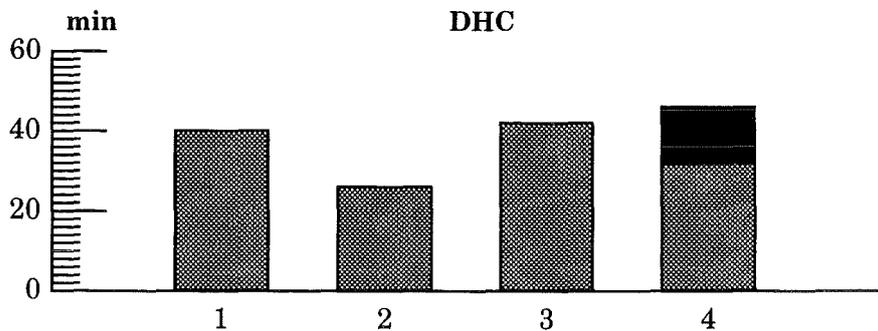
Bisher wurden mit dem Material von gebrauchten Fenstern nur einige Testversuche durchgeführt. Es ist also derzeit offen, ob und in welchem Umfang die theoretisch mögliche Lücke für Regenerate von 5 bis rund 50 % oder sogar mehr geschlossen werden kann. Inzwischen bieten in der BRD über 100 Unternehmen die Rücknahme gebrauchter Fensterrahmen gegen Gebühren an. Sie haben eine schriftliche Verpflichtung abgegeben, die Fensterprofile an die Verwerterbetriebe abzugeben. Die PVC-Fensterprofilhersteller haben ihrerseits zugesagt, das Rezyklat gebrauchter Fenster wieder für hochwertige Produkte einzusetzen. Angestrebt wird der Einsatz bei neuen Fensterprofilen<sup>22)</sup>.

---

21) Früher wurde z. B. eine Dichtlippe aus Weich-PVC, die zur Vermeidung einer Längenänderung einen Glasfaser-Faden enthielt, in die Dichtnut des Fensterprofils gepreßt. Der beim Regranulieren kleingeschnittene Glasfaden im Mahlgut stört jedoch später die Extrusion. Hingegen ist das Weich-PVC mit dem Profil-PVC verträglich. Das Verfahren wurde umgestellt: Noch während der Profilextrusion wird die Dichtlippe in einem weiteren Extrusionsschritt direkt in die Nut gepreßt. Der Glasfaden entfällt.

22) Technisch leichter machbar erscheint der Einsatz bei Bauprofilen, z. B. bei drucklosen Wasserrohren (Abwasserrohre), jedoch werden in diesen Sektor auch die rezyklierten Rohre selbst und Flaschenrezyklate gedrängt. Das geht auf Dauer nicht!

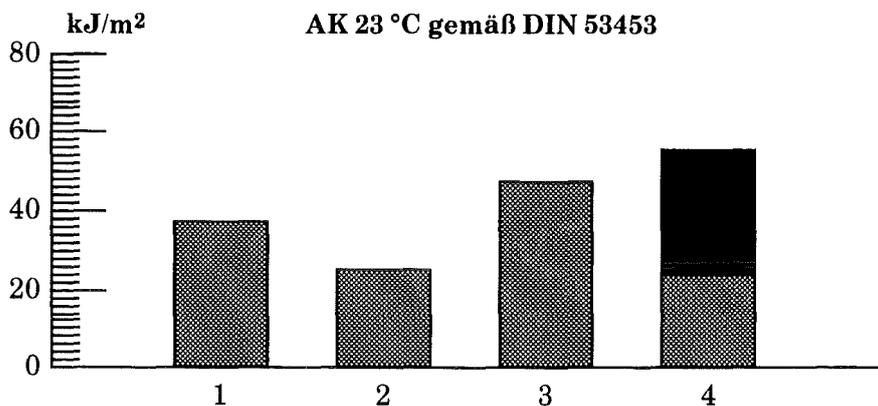
### Altfenster-Recycling Thermostabilität von Fensterprofilen



- 1 Ausgangsmaterial 1964
- 2 Profil aus 100 % Rezyklat (26 Jahre im Einsatz)
- 3 Profil aus 100 % Rezyklat, + Schlagzähmacher, + Stabilisierung
- 4 Üblicher Thermostabilitätsbereich (PB-frei)

**Bild 13:** Hoechst Altfensterrezyklat, Thermostabilität vor und nach Rezyklierung, mit und ohne Nachstabilisierung

### PVC-Altfenster-Recycling Kerbschlagzähigkeit von Fensterprofilen



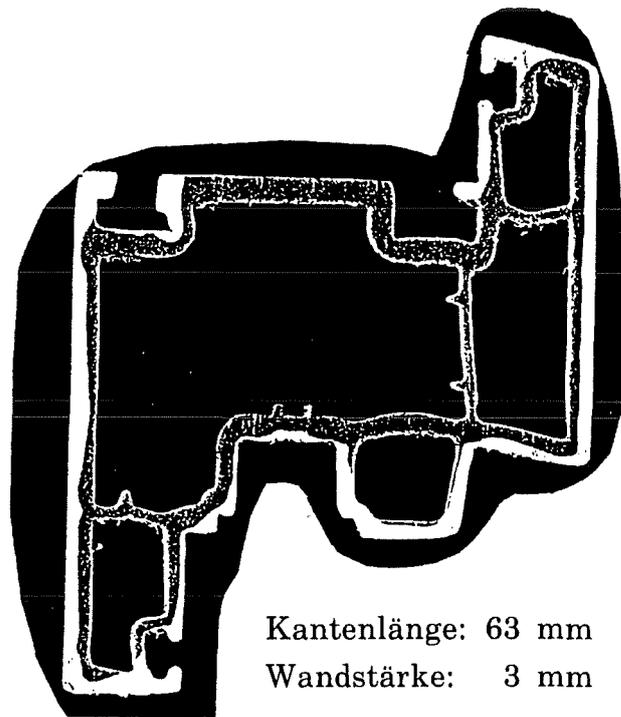
- 1 Ausgangsmaterial 1964
- 2 Profil aus 100 % Rezyklat (26 Jahre im Einsatz)
- 3 Profil aus 100 % Rezyklat, + Schlagzähmacher
- 4 Bereich Hochschlagzäh

**Bild 14:** Hoechst Altfensterrezyklat, Kerbschlagzähigkeit vor und nach Rezyklierung, mit und ohne Zugabe von weiteren Schlagzähmachern

### Fensterprofile aus Frischware und Rezyklat

Das Verarbeitungsverhalten des Rezyklats ist von dem der Neuware verschieden. Die Verarbeitung ist mit einem gewissen Schmutzanteil möglich ( $\approx 1\%$ ). Die Qualifizierung des Materials erfolgt in einem Meßextruder, gegebenenfalls Aufbesserung mit zusätzlichen Zuschlagstoffen (Stabilisierung, Schlagzähigkeit).

Fensterprofile mit Rezyklat-Anteil werden im Koextrusionsverfahren hergestellt. Mit einem "äußeren" Extruder wird Neuware, mit einem zweiten "inneren" Extruder wird Rezyklat in das Profil gepreßt. Die Wandungen des Profils bestehen vornehmlich aus zwei Schichten: außen, auf den sichtbaren Flächen Neuware; innen, auf den unsichtbaren Flächen Rezyklat. Das Verhältnis von Neuware zu Rezyklat beträgt hier 60 % zu 40 %; vgl. Bild 15 (Versuche sind auch mit 33 % Frischware und 67 % Rezyklat gemacht worden).



**Bild 15:** Fensterprofil der Firma Hüls Troisdorf (System Trocal-900-REC) mit Kern aus ca. 40 % Regenerat (dunkel) und Außenmantel aus ca. 60 % Neuware (hell)

### **Güterichtlinien**

Die Produktion von Neuprofilen erfolgt nach RAL-Güterichtlinien. Im neuesten Entwurf der einschlägigen Güterichtlinie RAL-RG 716/1 der Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofile im Qualitätsverband Kunststoffherzeugnisse ist die Verwendung von Hart-PVC-Rezyklat aus Fensterprofilen für die Neuproduktion ausdrücklich zugelassen. Nach Verabschiedung soll auch eine Überarbeitung der Fensterprofilnorm DIN 16830 in diesem Sinne angestoßen werden. Das gilt selbstverständlich auch für die in Arbeit befindliche europäische Fensterprofilnorm / UEATC Union Europeenne pour l' Agreement Technique dans la construction: Gemeinsame Richtlinie für die Erstellung von Agreements für Fenster/ (derzeitige Fassung nicht von allen europäischen Ländern anerkannt [Becker, Braun, 1986]). Es wird auf eine glatte Oberfläche Wert gelegt, weil davon die Wetterfestigkeit abhängt (Strahlungsabsorption bei Rauigkeit größer, Feuchteangriff ebenfalls).

### **Fensterprofilproduktion und Recycling**

Die Produktion ist auf maximalen Ausstoß ausgelegt. Bei Hüls Troisdorf beträgt die Extrusionsgeschwindigkeit für reine Frischware 3 m/min. Die Konkurrenz arbeitet bei 1,6 – 2 m/min. Es sind 4 Straßen von 30 für die Verarbeitung von Rezyklat eingerichtet. Diese Straßen werden langsamer gefahren. Recycling bedeutet (mindestens in der Anfangszeit) eine verminderte Produktionsgeschwindigkeit. Die Investitionskosten für einen einfachen Extruder betragen 900 000, – DM, für eine Ko-Extrusionsanlage 1,2 Mio DM. Der Platzbedarf ist etwas größer, da der zweite Extruder von der Seite her zugeführt und versorgt wird. (Auch Varianten von oben her sind in der Entwicklung.) Die nächste Straße muß also mit ihrem Anfang versetzt zur vorderen aufgestellt werden, der gesamte Platzbedarf steigt etwas an.

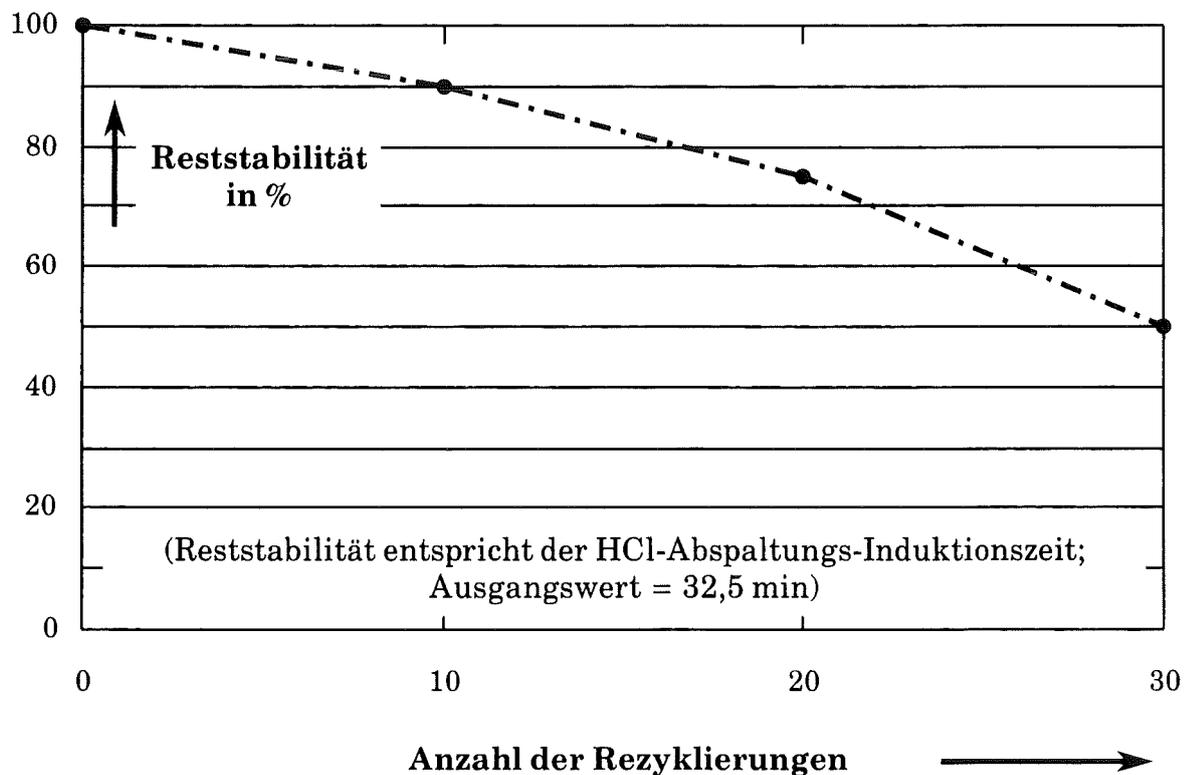
### **Preise für koextrudierte Profile**

Die Profile mit Recyclinganteil werden gegenwärtig um 20 % billiger verkauft als Neuprofile. Hüls-Troisdorf folgt damit ausdrücklich nicht dem Trend in anderen Branchen, das gestiegene Bewußtsein zum Gebrauch von Recyclingprodukten in Extragewinne durch höhere Preise als bei Frischware umzumünzen (wie z. B. häufig beim Recyclingpapier).

### Recyclingversuche an nicht bewittertem Profilmaterial

Folgende Untersuchungen zur Veränderung der Materialeigenschaften wurden durchgeführt:

Mit Neuware von zinnstabilisierten Profilen wurden Recyclingversuche durchgeführt. Bei der Verarbeitungstemperatur von ca. 160 °C gibt es eine geringe Abspaltung von HCl, die Stabilisierung wird beeinträchtigt. Durch die Wiederholung der Vorgänge beim Rezyklieren verschlechtert sich dadurch die Reststabilität laufend. Bild 16 zeigt die Abnahme der Reststabilität von kalandrierten Folien als Funktion der Anzahl der Recyclingvorgänge. Nach 9 Recyclingvorgängen beträgt die Reststabilität noch 90 %.



**Bild 16:** Zinnstabilisiertes PVC, Abhängigkeit der Reststabilität von der Anzahl der Recyclingvorgänge (Regranulierung nach der Extrusion, ohne Gebrauch) [Schadhauser, 1992]

In einer anderen Darstellung werden Werte für CaZn-stabilisierte Profile angegeben (Schadhauser, 1992). Hier ist die Stabilität bei einem Ausgangswert von 48 min nach 9 Verarbeitungen auf 34 min weitaus stärker gefallen (siehe Bild 18).

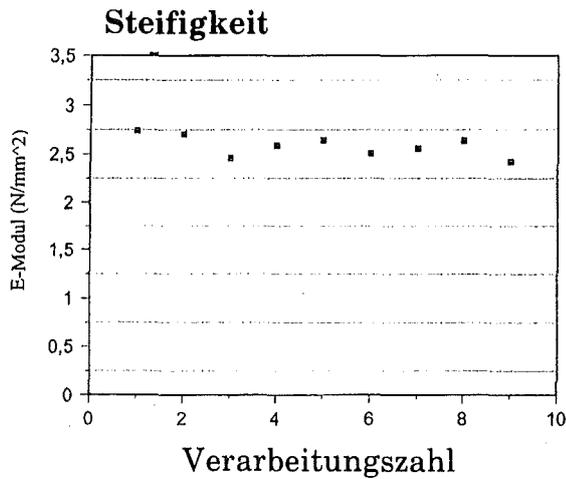
HI-PVC mit einem K-Wert von 68 (Vinnol H 68 D) mit Acrylatmodifizierung (Vinnol K 704) in einer CaZn-Stabilisierung wurde auf einem Weber DS 48-Extruder zu Profilen verarbeitet. Die Profile wurden anschließend geschreddert und unter gleichen Extrusionsbedingungen erneut zu Profilen verarbeitet. Dieser Vorgang wurde neunmal wiederholt. Nach jedem Extrusionsschritt wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Hitzestabilität
- Farbe (Lab)
- E-Modul
- Vicat <sup>23)</sup>
- Kerbschlagzähigkeit.

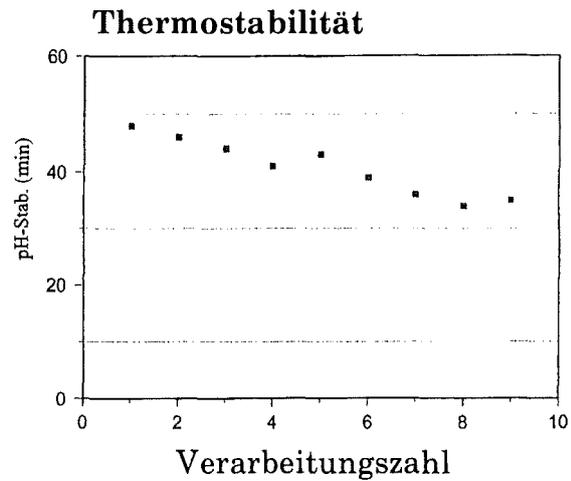
Zusätzlich wurde nach der ersten und der letzten Extrusion die Schmelzviskosität bestimmt. Die Bilder 17 – 20 zeigen, daß durch die Mehrfachverarbeitung der E-Modul um ca. 10 % abnimmt und die Vicaterweichungstemperatur nahezu unverändert bleibt. Die Thermostabilität reduziert sich über 9 Verarbeitungsschritte um ca. 30 %, ist aber noch immer ausreichend für eine weitere Verarbeitung. Die Kerbschlagzähigkeit ak 23 steigt leicht an, was mit der besseren Homogenisierung durch die Verarbeitung erklärbar ist.

---

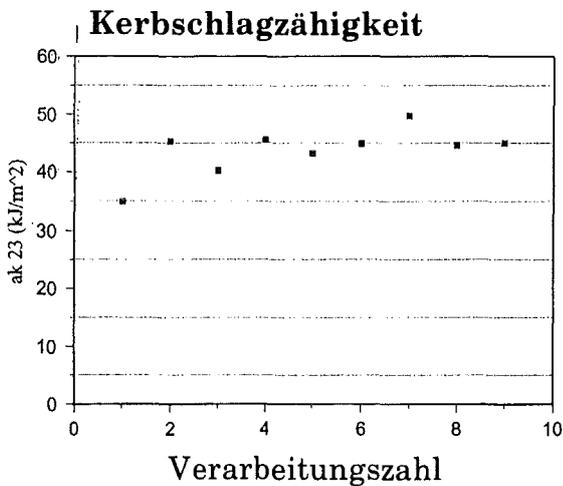
23) Vicat-Erweichungstemperatur: Temperatur, bei der ein Prüfstempel unter vorgegebener Kraft eine bestimmte Eindringtiefe ins Material erreicht.



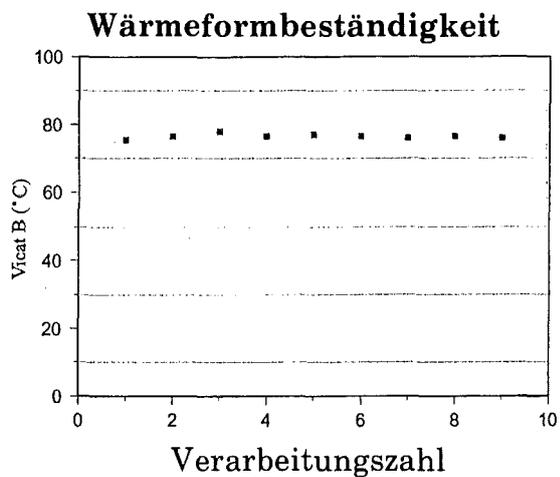
**Bild 17:** E-Modul von ungebrauchten (frischen) Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen



**Bild 18:** pH-Stabilität bei CaZn – stabilisierten Profilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen



**Bild 19:** Kerbschlagzähigkeit ak 23 von Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen

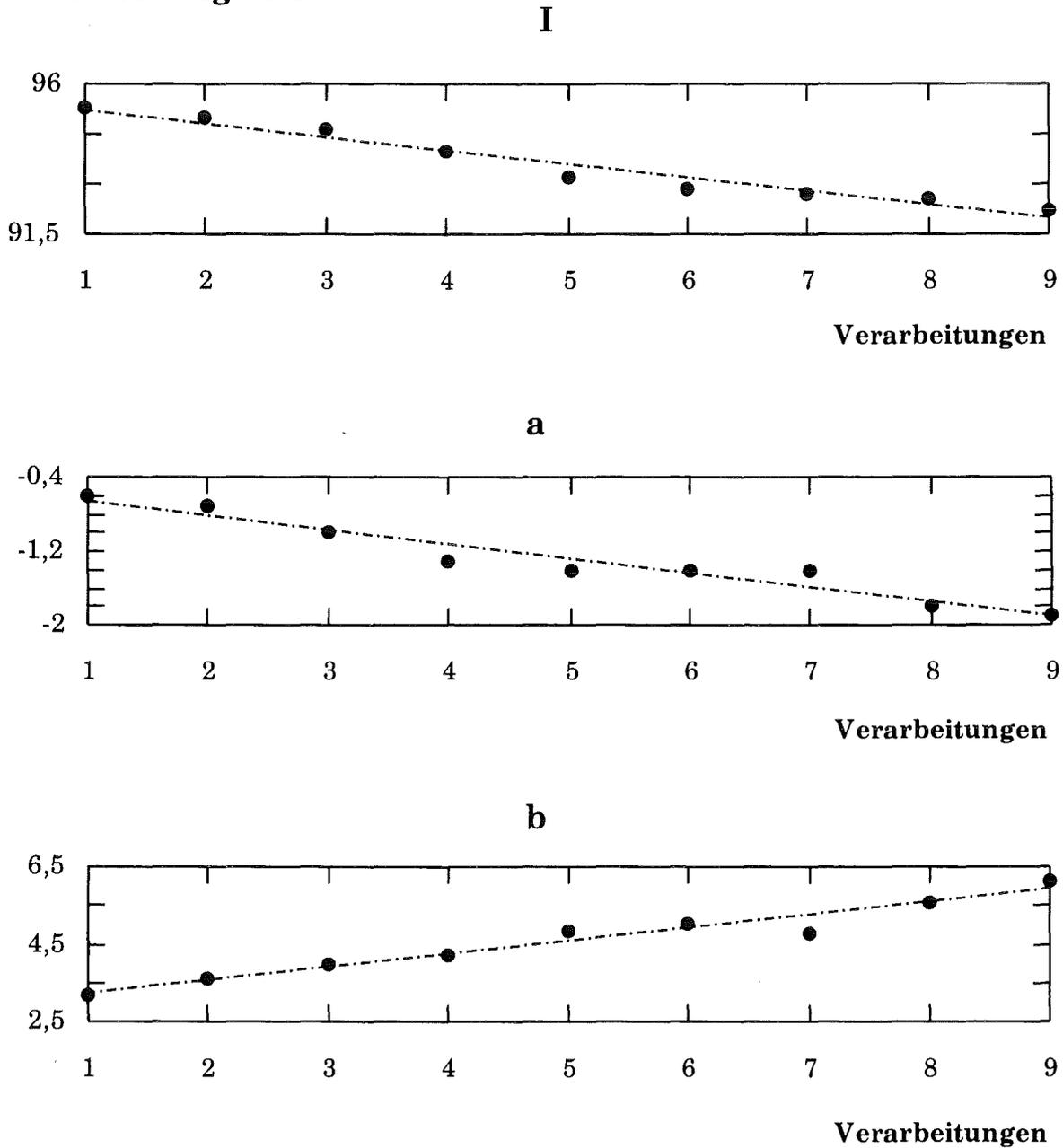


**Bild 20:** Wärmeformbeständigkeit (Vicat B) von Fensterprofilen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verarbeitungen

**Bild 17 bis 20:**  
Mehrfache Extrusion einer PVC-Fenstermischung (CaZn)  
[Schadhauser 1994 a]

Neben den mechanischen Werten wurden auch die Farbveränderungen geprüft. Bild 21 zeigt, daß neben einem Verlust im sogenannten Weißgrad (I) um ca. 4 % eine Farbverschiebung in den Gelbbereich (a und b) erfolgt. Die Maschinendaten über die 9 Verarbeitungsschritte blieben nahezu konstant.

### Farbmessung Lab



**Bild 21:** Farbmessungen an PVC-Profilen (DOMEX) [Schadhauser, 1992]

## 7.2 PVC-Rohre

Im Dezember 1992 wurden die Recyclinganlagen der Firma Wavin in Hardenburg / Niederlande besichtigt und Gespräche mit dem Technischen Manager geführt. Die Erkenntnisse und die erhaltenen Informationen (*Bredewold, 1992*) sind im folgenden dargestellt:

Wavin ist in Europa der größte Hersteller von Kunststoffrohren. Auf Initiative von Wavin haben die sechs niederländischen Rohrhersteller (3 kleine und 3 große) die Federation von Kunststoffsystemlieferanten (fks) gegründet, um gemeinsam das Recycling von gebrauchten Rohren und Fittings durchzuführen (Tab. 15). Die Gründe hierfür sind:

- Deponieraum wird knapper
- Verbrennung ist ein Problem
- Vorrang hat Vermeidung und Materialrecycling.

Tabelle 15: fks-Rohrhersteller in den Niederlanden

Fabrikant	Contactperson
	Draka Polva bv Flevolaan 1 Postbus 14 1600 AA Enkhuizen  <b>Mevr. O. Struis</b> Telefoon 02880 – 11789
	Dyka Steenwijk bv Produktieweg 7 Postbus 33 8330 AA Steenwijk  <b>Afdeling Verkoop Binnendienst</b> Telefoon 05210 – 28911
	Martens Kunststoffen bv Statendamweg 75 - 77 Postbus 30 4900 AA Osterhout  <b>De heer B. v. Straten</b> Telefoon 01620 – 22900
	Omniplast Nederland bv Taylorweg 4 Postbus 521 5460 Am Veghel  <b>De heer J. van Herk</b> Telefoon 04130 – 62921
	Viplex Plastics bx Lochtersweg 55 Postbus 49 7440 AA Nijverdal  <b>De heer G. Geerling</b> Telefoon 05486 – 12065
	bv Wavin KLS J. C. Kellerlaan 3 Postbus 5 7770 AA Hardenberg  <b>De heer G. Jonkeren</b> Telefoon 05232 – 88324

## Recycling von gebrauchten Rohren

Der Recyclingprozeß gliedert sich in

1. Einsammeln
2. Behandlung
3. Verwendung

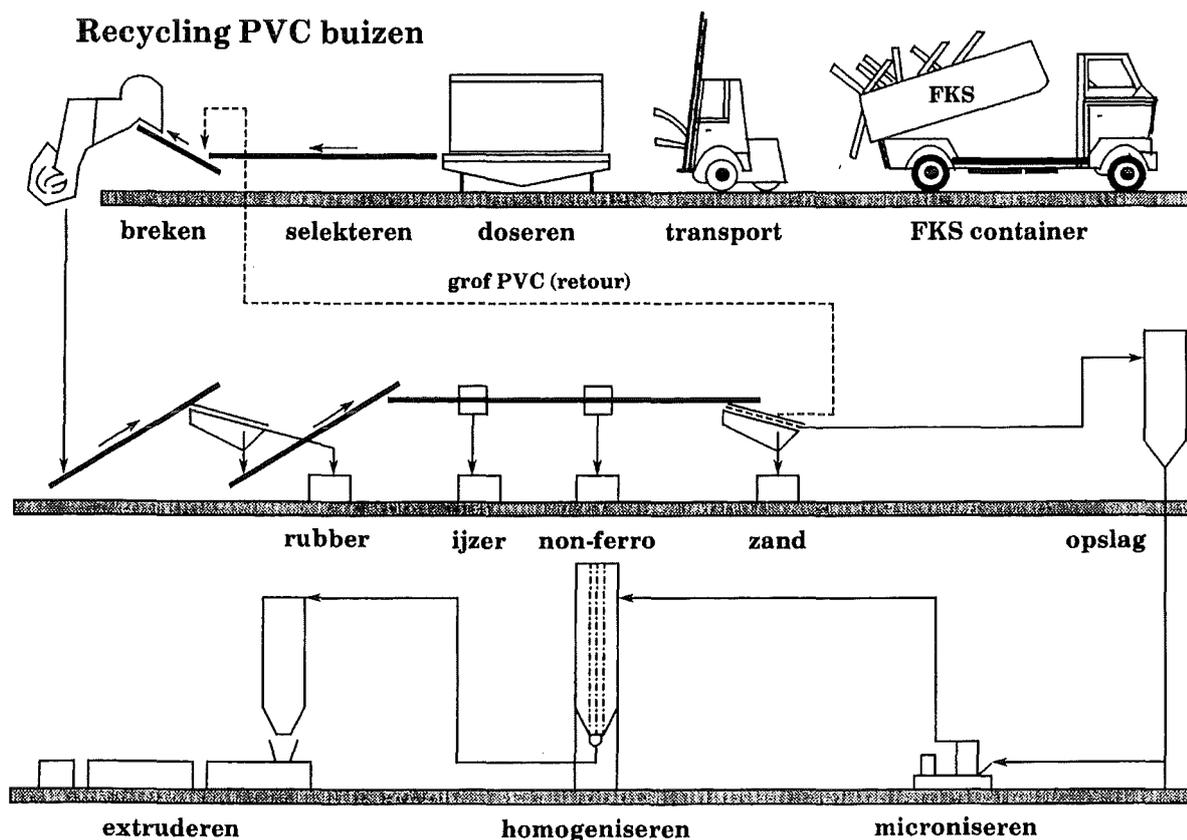
Das *Einsammeln* der gebrauchten Rohre erfolgt mit 30 Containern, die gleichmäßig über das Land in *Depots* verteilt sind. Zu diesen 30 Depots kann der Kunde seine *PVC- und PE-Abfälle ohne Bezahlung* bringen, die Depots sind von 7<sup>00</sup> bis 16<sup>00</sup> Uhr bewacht, die angelieferten Altprodukte werden kontrolliert, bei Fehlverhalten werden sie mit 0,50 Gulden / kg Altprodukt belastet. Für große Mengen können Container gemietet werden (150 Gulden / Monat), für ihren Transport sind 475 Gulden zu entrichten. Der Kunde erhält bei Ablieferung 0,20 Gulden / kg. Das Fassungsvermögen der Container beträgt 30 m<sup>3</sup>, die mittlere Packungsdichte ist 85 kg/m<sup>3</sup>. Der Kunde spart die Deponiekosten (200 Gulden / t) ein. Mit 157 Containern (36 davon waren in 30 Deponien stationiert) werden etwa 1 200 t/a Kunststoffe (PVC + PE + PP) gesammelt. Die Verschmutzung beträgt rund 4 %. Die fks-Kosten beliefen sich auf 300 000 Gulden.

Die für die Zukunft in den Niederlanden zu erwartenden *Mengen* wurden von einer gemischten Arbeitsgruppe aus Industrie und Ministerien abgeschätzt:

- 1 Mio t Rohre sind verbaut.
- **Die jährliche Neuproduktion beträgt 100 000 t.**
- Nach einem in der Vorbereitung befindlichen Gesetz sollen alte Rohre vom Hersteller zurückgenommen werden, es sollen keine Rohre auf der Deponie abgelagert werden.
- 1991 wurden rund 1 000 t alte Rohre zurückgenommen, das sind 1 % der Neuproduktion.
- Mit großen Rücklaufmengen wird in dem Zeitraum 2010 bis 2020 gerechnet.
- PVC-Rohre werden hauptsächlich mit Rohrdurchmessern im Bereich von 110 bis 630 neu hergestellt. Bis zu einem Durchmesser von 315 mm sind bereits alle Betonrohre ersetzt worden. Der Bereich 315 bis 630 mm Durchmesser wird als Übergangsbereich angesehen. Für Rohre > 600 mm Durchmesser ist der Werkstoff Beton günstiger als PVC.
- **Der Markt für drucklose Rohre beträgt 5 000 – 10 000 t/a, das sind kaum 10 % der jährlichen Neuproduktion.** Weitere Anwendungen für Produkte mit Rezyklatanteil werden gesucht.

Zur *Behandlung* der eingesammelten Rohre, Bild 22, werden sie zunächst in einer überdachten Halle trocken gelagert. Das Aussortieren der PE-Rohre erfolgt manuell mit einer Fehlerquote < 0,1 %. In einem Steinbrecher (160 KW Antriebsleistung) werden die PVC-Rohre in kleine Stücke (< 12 mm) zerstrümmert, zerquetscht und zerrissen, es entstehen 2 t PVC-Granulat pro Tag. Am Altmaterial anhaftender Schmutz und Metallreste (Eisen und Kupfer) werden maschinell aus-

gefiltert (abgesiebter Sand pro Woche: 500 kg, Restschmutzpotential 0,05 %) bzw. abgeschieden (Eisenteile mit einer drehenden Magnettrommel, Kupferteile nach dem Verdünnungsprinzip mit Hilfe von Lasermeßtechnik). PVC-Anteile mit Abmessungen > 12 mm durchlaufen den Steinbrecher ein zweites Mal. In einer Hammermühle werden die PVC-Stücke aus dem Steinbrecher pulverisiert zu einem Teilchenspektrum mit Teilchen von maximal 500 µm. Verschiedene Chargen von PVC-Pulver werden homogenisiert und in Silos zwischengelagert. Von dort gelangt das PVC-Pulver im trockenen Zustand zur Verarbeitung in Koextrusionsstraßen. Hier werden die Innen- und Außenschichten aus Frischware, die Mittelschicht aus Rezyklat ausgebracht. Es ergibt sich ein Anteil von 60 % Frischware zu 40 Rezyklat: Damit schrumpft die augenblicklich unterzubringende Rezyklatmenge auf 2 000 ÷ 4 000 t/a.



**Bild 22:** Recycling von gebrauchten PVC- und PE-Rohren bei Firma Wavin, Niederlande

## Recycling von gebrauchten Rohren

In den Produktionsstätten von Wavin in Hardenberg werden in 10 % der PVC-Straßen Rohre unter Einsatz von Rezyklat hergestellt. Die *Rohrrecyclingstraßen* sind in der gleichen Fertigungshalle seit März 1992 bzw. Oktober 1992 in Betrieb, auf ihnen wurden bisher ausschließlich Testrohre zur Erprobung des Verfahrens hergestellt. Alle wichtigen technischen und chemisch / physikalischen Daten werden dabei aufgezeichnet, die produzierten Rohre werden gekennzeichnet (Materialdaten und exakte Herstellungszeit).

In Anlehnung an die praktischen Erfahrungen bei der Herstellung werden für die Niederlande und Europa *Normen* und *Standards* entwickelt, deshalb sind die kontinuierlichen Messungen in der Erprobungs- und Entwicklungsphase erforderlich. Die in der fks zusammengeschlossenen Kunststoff-Fabrikanten nehmen keine gebrauchten Rohre aus dem Ausland an und exportieren kein PVC-Pulver aus gebrauchten Rohren ins Ausland.

In England werden z. B. Rohre mit einem Kreidezusatz von bis zu 40 % hergestellt. Für das Recyclingmaterial solcher Rohre ist jedesmal eine Bleizugabe erforderlich, um extrudieren zu können. Die Bleistabilisatoren verwandeln sich zu Bleichloriden (Salze). Das führt zu Problemen.

Das Prinzip der Produktverwertung lautet:

- Rohrproduzenten nehmen Rohre zurück.
- Flaschenproduzenten nehmen Flaschen zurück.
- Fensterprofilproduzenten nehmen Fensterprofile zurück.
- usw.

Als mögliche Zyklen für das Recycling von gebrauchten Rohren wurde die Zahl Drei genannt. Es wird auch manchmal die Zahl Sieben genannt, dafür gibt es aber keine Untersuchungen.

Die Kostenbilanz für Rezyklate sieht derzeit folgendermaßen aus:

• Altmaterial in Eingangshalle (20 + 7)	27 Cents / kg
• Recycling (Energie, Transport, Arbeit, Miete ...)	40 Cents / kg
• Mikronisieren	15 Cents / kg
Summe	<hr/> 82 Cents / kg

Der Preis für Neuware ist derzeit 125 Cents / kg

Die Rohrbranche in der BRD bereitet noch 1993 ein flächendeckendes Rücknahmesystem vor (*Eckstein, 1993*). Es muß jedoch festgehalten werden:

**Für die überwiegende Menge der PVC-Rohre, insbesondere für die Druck-Rohre, gibt es derzeit noch kein Materialrecycling-Konzept.**

### 7.3 PVC-Bodenbeläge

Insgesamt wurden 1987 in der Bundesrepublik etwa 105 000 t PVC-Bodenbeläge hergestellt, davon waren nur etwa 48 000 t Roh-PVC, das entspricht einem Anteil von 46 %.

Typische Rezepturen sind (Hofmann, 1992 a):

• PVC	28	–	50 %
• Weichmacher	10	–	20 %
• Stabilisatoren	0,5	–	1 %
• Gleitmittel		<	1 %
• Füll- und Verstärkungstoffe	25	–	60 %
• Pigmente	1	–	5 %

Der Roh-PVC-Anteil beträgt nur ein Viertel und höchstens 50 %. Große Anteile bilden Füll- und Verstärkungstoffe sowie Weichmacher.

Die Hauptgruppen sind kalandrierte Beläge und geschäumte Beläge, siehe Tabelle 16.

**Tabelle 16:** PVC-Verwendung in Bodenbelägen (BRD 1987)  
[Tötsch / Gaensslen, 1990]

Belagsart	Produktionsmenge (kt)	PVC-Gehalt (kt)
Kalandrierte Beläge	55 000	18 000
Geschäumte Bodenbeläge	42 000	21 000
Streichbeläge	8 000	5 000
Teppichrückenbeschichtung	–	4 000
<b>Summe</b>	<b>105 000</b>	<b>48 000</b>

Die Produktion von PVC-Bodenbelägen ist wegen der Konkurrenz des Teppichbodens rückläufig. Für 1991 werden für den Inlandsverbrauch angegeben:

PVC-Beläge: 55 Millionen m<sup>2</sup>

Textile Beläge: 310 Millionen m<sup>2</sup>

Davon sind bei den PVC-Belägen etwa ein Drittel kalandrierte Beläge (homogene/heterogene Typen) und etwa die Hälfte geschäumte Beläge – Cushion Vinyls, CV (Hofmann, 1992 a).

Zur Nutzung des Rohstoffpotentials aus Alt-PVC-Bodenbelägen im industriellen Maßstab haben sich im April 1990 19 PVC-Rohstoff- und -Bodenbelaghersteller aus der BRD und dem europäischen Ausland zur Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR) zusammengeschlossen (siehe Tab. 17).

**Tabelle 17:** Die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag-Recycling, Gründung April 1990

<b>Gesellschafter</b>	
<p><b>Rohstoffhersteller:</b>                      ELF ATOCHEM                      BASF                      EVC-Deutschland GmbH                      Hoechst AG                      Hüls AG                      Norsk Hydro                      Solvay                      WACKER</p>	<p>Frankreich                      Deutschland                      Deutschland                      Deutschland                      Deutschland                      Norwegen                      Deutschland                      Deutschland</p>
<p><b>Bodenbelaghersteller:</b>                      Armstrong                      Dätwyler AG Bodenbeläge                      DLW AG Bodenbeläge                      Dunlop GmbH                      FABELTA Scaldyl                      Forbo                      Gerland                      Hellemann                      Hüls Troisdorf AG                      INTERPLASTIC-Werk AG                      SOMMER                      Tarkett Pegulan</p>	<p>Großbritannien                      Schweiz                      Deutschland                      Deutschland                      Belgien                      Schweiz / Niederlande                      Frankreich / Deutschland                      Deutschland                      Deutschland                      Österreich                      Frankreich / Luxemburg                      Deutschland</p>

<b>Gesellschafter-Ausschuß</b>
<p>D. Armbröster, Dunlop GmbH (Sprecher)                      Dr. W. Kleinloh, Hüls AG (stellv. Sprecher)                      G. A. Fries, Solvay Deutschland                      Drs. A. J. Pluijmert, Forbo                      Dr. H.-G. Scholz, Tarkett Pegulan                      P. Fiedel, Wacker und H. Wrede, Vinnolit</p>
<p><b>Geschäftsführer:</b>                      Dr. V. Hofmann, Hüls Troisdorf AG</p>

Diese Arbeitsgemeinschaft sieht ihre Aufgabe darin, ein Branchenmodell für Recyclingaktivitäten anzubieten. In ausgesuchten Testgebieten wurde mit eigenfinanzierter Logistik das Sammeln begonnen, dabei werden sortenreine Alt-PVC-Bodenbeläge kostenlos angenommen.

Entsprechend einer AgPR-Sortierliste werden zur Verwertung gesammelt: Homogenbeläge (einschichtige Beläge, durchgehend marmoriert), Heterogenbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Trägerschicht), Systembeläge (dickere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum), CV-Beläge (dünnere PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum), PVC-Wandbeläge (PVC-Nutzschicht auf PVC-Schaum) und PVC-Schweißschnur. Nicht angenommen werden alle Nicht-PVC-Beläge sowie CV-Beläge auf Asbestpappe.

Zur Wiederaufarbeitung der sortierten Alt-PVC-Beläge wurde von den Fußbodenherstellern in Großefehn / Ostfriesland die AgPR-Recyclinganlage errichtet. 1991 wurde die Anlage in Betrieb genommen, 1992 konnten im Monat rund 100 t verwertbares Rezyklat hergestellt werden (Bild 23).

Auf einem Sortierband werden die angelieferten Alt-PVC-Beläge manuell nachsortiert, mit einer hydraulischen Schere zerkleinert und in zwei Schreddern weiter zerkleinert. Fremdstoffe, insbesondere Staub und Metalle werden dabei ausgesondert. In einer Hammermühle und einer Schneidemühle wird das Material zu Körnern zerkleinert, dann durch ein Mischsieb geführt und schließlich in einer Feinmühle zu Pulver verarbeitet.

Die PVC-Gehalte des pulverförmigen Mahlgutes schwanken zwischen 48 und 52 %, die Weichmachergehalte schwanken zwischen 22 und 31 % und der Füllstoffanteil (Kreide, Kaolin, Silikate) zwischen 15 und 28 %. Die Partikeldurchmesser des Mahlgutes liegen zwischen 20 und 300 µm, der mittlere Korndurchmesser liegt bei 170 µm (*Hofmann, 1992 b*).

Im Dezember 1992 wurde die AgPR-Recyclinganlage in Großefehn im Betriebszustand besichtigt und Gespräche mit den zuständigen AgPR-Vertretern geführt. Nach einigen Anlaufschwierigkeiten wurde im Oktober 1992 als wesentliche Verbesserung ein Stickstoff-Tiefkühlprozeß der Pulveranlage vorgeschaltet. Damit konnte die Verschmierung der Schlagmesser in der Feinmühle beseitigt werden und der Durchsatz um etwa den Faktor 5 auf einen wirtschaftlich akzeptablen Wert erhöht werden.

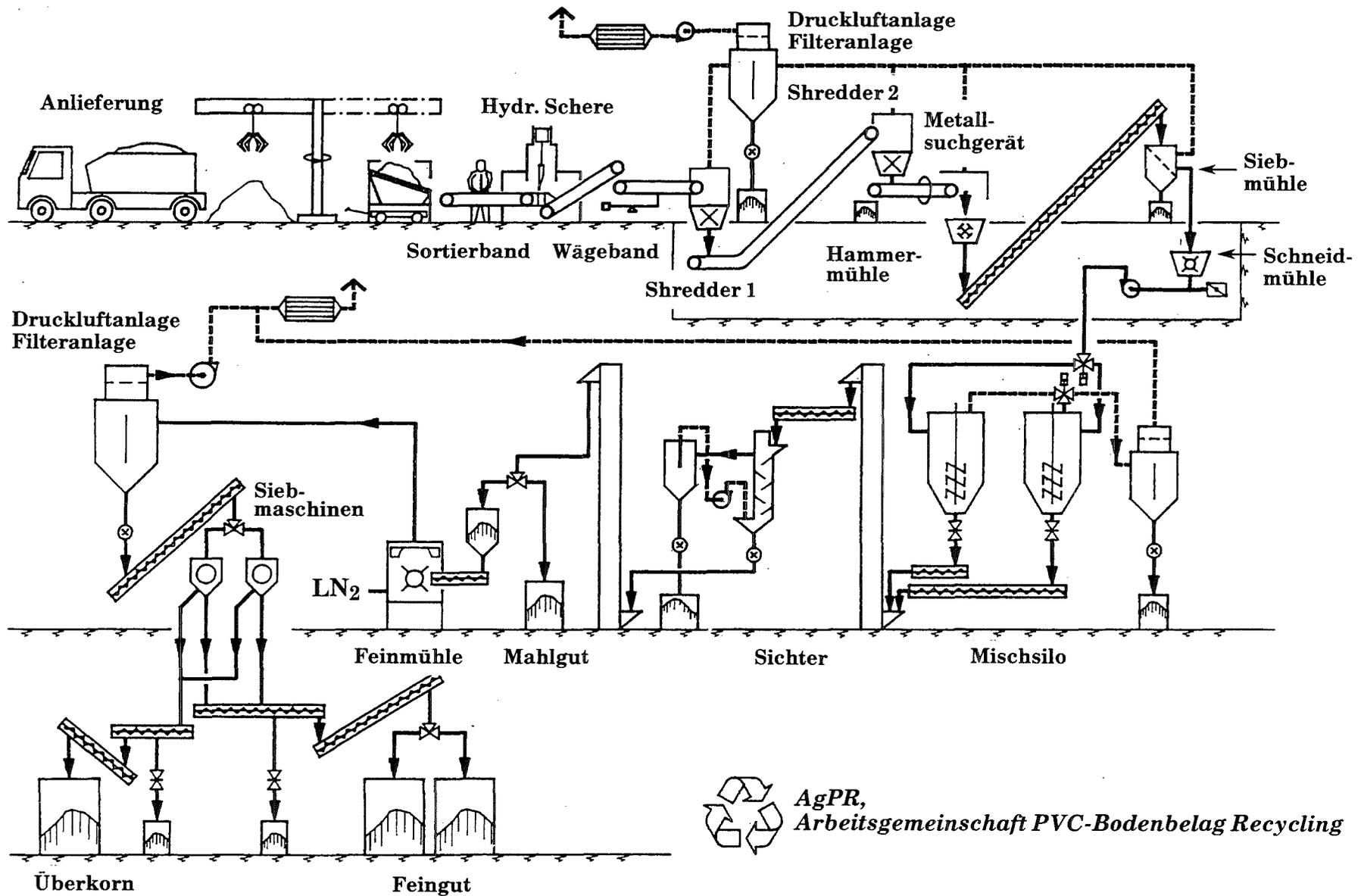


Bild 23: Skizze der AgPR-Recyclinganlage für gebrauchte PVC-Bodenbeläge

Die AgPR-Vertreter rechnen künftig bei 80 000 t Neu-PVC-Bodenbelägen pro Jahr mit einem theoretischen Sammelpotential von etwa 40 000 t Alt-PVC-Bodenbelägen (50 %), das würde 0,5 kg pro Einwohner und Jahr entsprechen. Es wird angestrebt, den Durchsatz der AgPR-Recyclinganlage von jetzt 100 t / Monat auf 400 t / Monat zu steigern, das entspräche z. Zt. 10 % der Altprodukte und 5 % der Neuproduktion. Bei Auslastung der Anlage sollen weitere folgen.

Das aus den Alt-PVC-Belägen aufbereitete Rezyklat wird von den Herstellern zusammen mit Neu-PVC verarbeitet. *Kalandrierte Bodenbeläge von 2 mm Dicke bestehen z. B. je zur Hälfte aus einer Unterschicht Altmaterial und einer oberen Nutzschiicht Neumaterial.* Um gleiches Dekor und eine mit reiner Neuware vergleichbare Qualität liefern zu können, muß jeder Hersteller das Rezyklat für seinen Prozeß anpassen. Zu den Kosten der Recyclingware konnten 1992 derzeit noch keine konkreten Aussagen gemacht werden. Zunächst einmal soll der Recycling-Prozeß weiterentwickelt und technisch angeboten werden, die Kostenschleife wird folgen.

#### 7.4 PVC-Folien

Im Januar 1993 wurde die Wiederaufbereitungsanlage für PVC-Folien bei der Firma Höchst im Werk Gendorf besichtigt. Dabei wurden Gespräche in den Bereichen Entwicklung PVC-Folien und Betrieb PVC-Folien geführt.

Über den derzeitigen Einsatz von PVC-Folien im Werk Gendorf ergibt sich folgendes Bild (*Deiringer, 1993*):

#### ***Produktion von Frischware und Recycling von Verschnitt***

(Recycling in der Herstellphase)

Die Jahresproduktion im Werk Gendorf beträgt mit rund 40 000 t Hart-PVC-Folien etwa  $\frac{1}{4}$  der Gesamtproduktion der BRD. Die produzierten Folien sind zwischen 25 und 700 µm dick, die Hauptmengen liegen im Bereich zwischen 100 und 200 µm.

Die Produktionsmengen in den einzelnen Bereichen betragen 1991 etwa:

- |   |                   |
|---|-------------------|
| • Folien für Pharmabereich              | 3 000 t           |
| • Sehr dünne technische Folien, < 40 µm | 15 000 t          |
| • Folien für Lebensmittelbereich        | 15 000 – 20 000 t |
| • Sonstige technische Folien            | 7 000 – 10 000 t  |

## Recycling von Folien-Verschnitt

Im Werk Gendorf wird in der Produktionsabteilung Folien PVC-Folienverschnitt verarbeitet mit dem Ziel, das Potential für vermehrten Verschnitteinsatz zu untersuchen.

Der Eigenverschnitt *am Kaland*er beträgt geschätzt 8 – 10 %, das heißt, für 100 kg Verkauf müssen 108 bis 110 kg produziert werden. Dieser Verschnitt wird dem Kaland direkt wieder zugeführt und nicht extra bilanziert.

Verschnitt bei der Produktion (5 – 7 %) und der Weiterverarbeitung der Neu- und Halbfertigware wird in drei Klassen eingeteilt:

- Sauberer, kalandrierbarer Verschnitt für Primärware
- Buntverschnitt aus Produktion und Kundenrückware
- Verschmutzte PVC-Folienverschnitte.

Verschnitt wird nach Herkunft erfaßt, gemahlen und nach Klassen und Qualitäten sortiert, damit Rezept- und Farbunverträglichkeiten möglichst gering gehalten werden.

Die Preise betragen für

- |                               |              |   |            |
|-------------------------------|--------------|---|------------|
| • Rohstoffkosten (Ostländer): | 0,90 DM/kg   | – | 0,95 DM/kg |
| • frische Folie:              | Ø 3,80 DM/kg | – | 4 DM/kg    |
| • für Rezyklat:               | Ø 1,80 DM/kg | – | ?          |
| • Mahlen:                     | 0,15 DM/kg   | – | 0,20 DM/Kg |
| • Aufbereitung:               | 0,50 DM/kg   |   |            |

1991 fielen insgesamt 6 000 t an bzw. wurden angeliefert. Davon waren 2 000 t Verschnitt bei der Produktion und 2 000 t Verschnitt durch Konfektionierung. Weitere 2 000 t Verschnitt kamen von Kunden aus dem Verarbeitungsbereich von außen zurück in das Werk.

1992 wurden 7 200 t angeliefert davon 3 200 t nach außen verkauft, 3 000 t wieder verarbeitet (rezykliert) und 1 000 t auf die Deponie verbracht.

Insgesamt werden  $\frac{2}{3}$  bis  $\frac{3}{4}$  wieder als Recyclingmaterial in Folien eingearbeitet, also rund 10 % der Neuproduktion. Die Restmengen werden zur **Weiterverwertung an Profilverarbeiter** geliefert.

Der Verschnitteinsatz läßt sich mittelfristig bei 75 % des derzeitigen Folienprogramms wahrscheinlich nur um 25 – 35 % steigern (ohne Berücksichtigung des Kalandbetrieb-internen Verschnitts), das sind 1 500 – 2 100 t mehr. Mit insge-

samt 8 000 t ist das Potential für die Recyclingmenge in der Herstellphase 20 %, die sonst entsorgt werden müßten.

Vorteile des Verschnitteinsatzes sind:

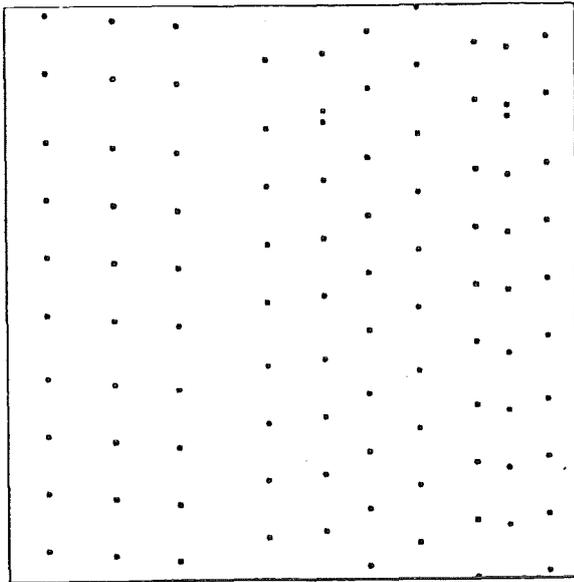
- Die Umwelt wird vom Abfall entlastet und es entstehen keine Entsorgungskosten.
- Bei einem PVC-Preis von 1,10 DM/kg und einem Verschnittpreis von 0,40 DM/kg ergibt sich ein Preisvorteil von 0,70 DM/kg Verschnitteinsatz. Bei z. B. 30 % Verschnitteinsatz würden die Materialkosten um ca. 0,20 DM/kg Folie verringert werden. Bei ca. 4 000 t Verschnitteinsatz erzielt man so etwa 2,8 Millionen DM geringere Materialkosten. Vergütungen für die Kundenverschnittrücknahme reduzieren diesen Gewinn.
- Ist der Verschnitt sauber und rezeptverträglich, dann ist die verschnittthaltige Folie qualitativ bezüglich Optik (Glanz, Stippen) häufig besser, weil der Verschnitt schon "vorgeliert" ist.

### ***Probleme beim Rezyklateinsatz und Güterichtlinien***

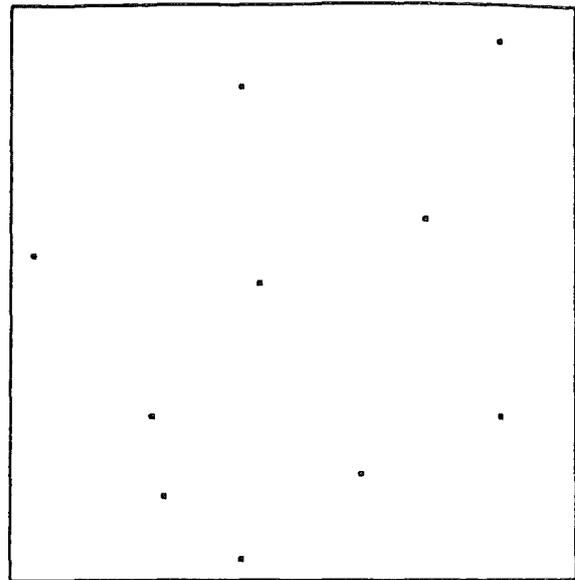
Die Anforderungen an die Reinheit des Rezyklats sind sehr hoch. Der Fremdstoffanteil darf beim Originalrohstoff nur 1 ppm betragen, damit insbesondere bei sehr dünnen Folien Ausschuß durch Löcher und Abrisse vermieden werden kann. In Bild (24) sind zur Anschauung Fremdstoffanteile zwischen 1 Gew.-% und 10 ppm optisch anhand von Fehlstellen in einer Vergleichsfläche dargestellt.

Probleme gibt es bei schwer entflammaren und raucharmen Rezepteeinstellungen, bei Folienverschnitt mit hohen K-Werten sowie hohen Wachs- und Emulgatorgehalten, bei Folienverschnitt mit relativ viel flüssigen Additiven, bei halbfarbenen Folien mit Blau-, Grün- und Violettstich sowie bei glasklarem Folienverschnitt aus weniger sauberer Rücklaufware. Bei glasklarer Ware führen schwer unterscheidbare Fremdstoffe aus PET, PP und PS häufig zu Problemen. Hauptsächlich führen Gelierprobleme zur Stippenbildung (punktförmige Fehlstellen in der Folie).

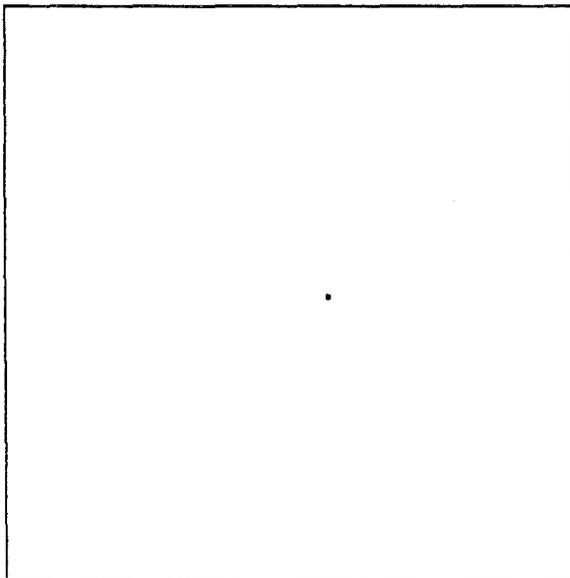
Für den Baubereich muß der Inhalt des Folienmaterials nach DIN 4102 genau definiert werden können, insbesondere müssen die Anforderungen an den Brandschutz gewährleistet sein. Deshalb kann bisher im Baubereich kein Rezyklat eingesetzt werden. Ebenfalls kann im Pharma- und Lebensmittelbereich kein Rezyklat eingesetzt werden.



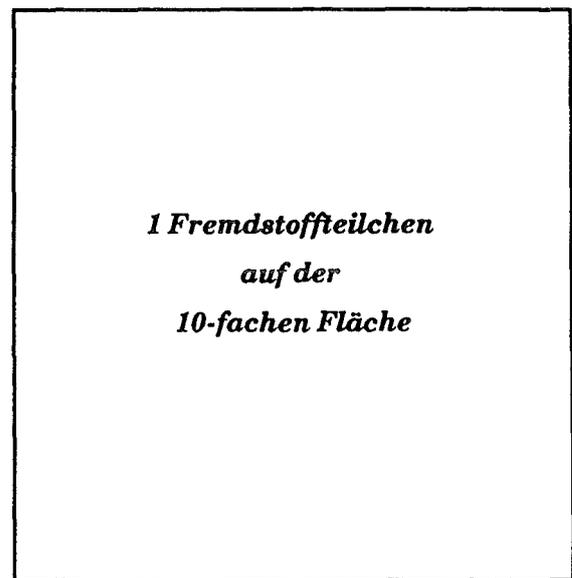
1 Gew.-% (10 000 ppm)  
Fremdstoffe  
99 % rein



0,1 Gew.-% (1 000 ppm)  
Fremdstoffe  
99,9 % rein



00,1 Gew.-% (100 ppm)  
Fremdstoffe  
99,99 % rein



0,001 Gew.-% (10 ppm)  
Fremdstoffe  
99,999 % rein

**Originalrohstoff:** 1 Fremdstoffteilchen auf der 100-fachen Fläche  
0,0001 Gew.-% (1 ppm) Fremdstoffe, 99,9999 % rein

**Bild 24:** Fremdstoffteilchen in einer Folie mit Rezyklatanteil. Der Verunreinigungsgrad wird durch Punkte in einer Vergleichsfläche dargestellt

### **Grenzen des Verschnitteinsatzes:**

- Nur in Folien > 40 µm für technische Anwendungen (außer Bau) können Rezyklate eingesetzt werden. Es lohnt sich erst > 100 µm. Dies ist ein Bereich von maximal nur 25 % der gesamten frischen Folienproduktion ("sonstige technische Folien").
- Im allgemeinen ist beim Verschnitteinsatz sowohl das Farb- als auch das Grundrezept zu korrigieren. Beim Grundkonzept müssen z. B. die Menge des Verarbeitungshilfsmittels, des Sojabohnenöls, des Stabilisators, einzelne Wachskomponenten, die PVC-Komponenten und weiteres optimiert werden. Beim Farb Rezept muß die optimale Kombination von Verschnittqualitäten gesucht werden, damit das Farb Rezept nur wenig korrigiert werden muß.
- Besonders bei Glasklar-Folien gibt es öfters Probleme mit Stippen und Fremdkörpern. Eine 10 t-Fehlproduktion bedeutet z. B. 27 000 DM Verlust (bei 2,70 DM/kg).
- Wird ein größerer Teil einer Folientype für Pharma verwendet, so ist der Einsatz von Verschnitt in dem Restteil oft problematisch (logistische Gründe, Verwechslungsgefahr).
- Infolge des Optimierens der Kalenderdaten, des Rezepts, der Farbzugabe und der Sondermaßnahmen im Mischhaus sind Kampagnen von mindestens 10 t zu fahren, sonst wären die Einfahrverluste zu groß.
- Beim Einsatz von über 50 % Verschnitt treten je nach Rezept Gelierprobleme auf, die zu einem Minderausstoß führen.
- Bei Dünnsfolien (< 100 µm) führt Verschnitteinsatz häufig zu Löchern und Abrissen, weshalb sich der Einsatz von Verschnitt hier nicht lohnt.
- Beim mehrfachen Recycling von hoch-verschnitthaltigen Folien bilden sich häufiger gelbe Brandstreifen oder schwarze Punkte aus verbranntem PVC.
- Bei Folien, die durch Beschichten und Kaschieren weiterverarbeitet werden, ist der Einsatz von Verschnitt sehr kritisch, weil undefinierte Oberflächeneigenschaften zu Haftungsproblemen führen können.

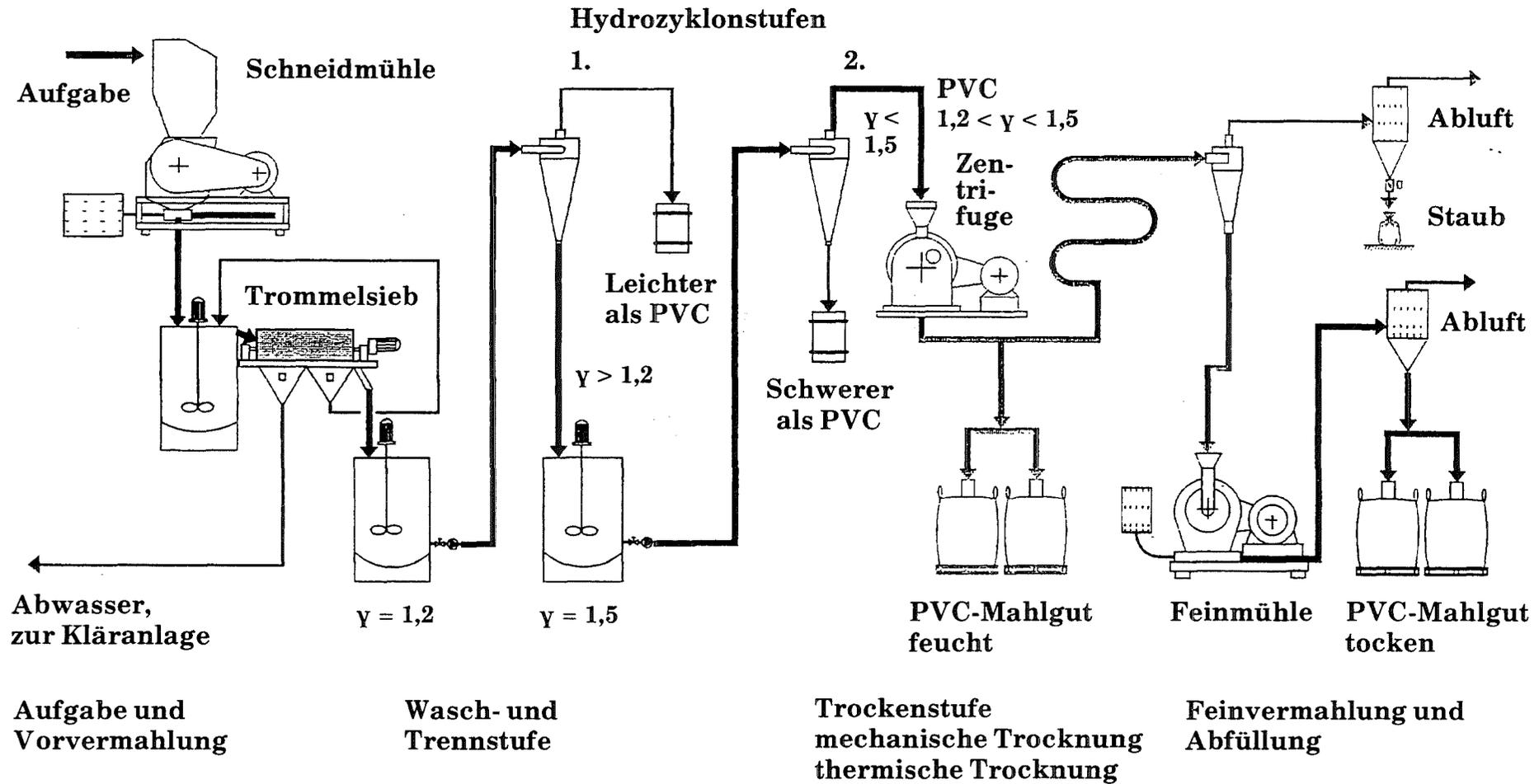
Deutlich mehr Verschnitt kann im wesentlichen nur durch folgende Maßnahmen eingesetzt werden:

- Bei Folientypen, die derzeit keinen Verschnitt enthalten dürfen. Größere Toleranz bezüglich Optik, Farbe, mechanischen Werten u. ä. müßten mit den Kunden diskutiert und vereinbart werden.
- Durch Steigerung der Verkaufsmenge verschnitthaltiger Folien.
- Durch Verkauf spezieller Rezyklat-Folien oder Rezyklat-Platten.

### **Wiederaufbereitungsanlage für PVC-Folienverschnitte**

Über die Wiederaufbereitungsanlage für PVC-Folienverschnitte (WILMA), können folgende Informationen festgehalten werden (Martl, 1993), Bild 25:

Die Eingangsprodukte in die Aufbereitungsanlage sind ausschließlich **Folienverschnitte der Folienverarbeiter** und dienen zu deren **Entsorgung**. Die **Kundenentsorgung erfolgt nicht** über den Grünen Punkt, demzufolge muß die Anlage wirtschaftlich arbeiten.



Hoechst AG Werk Gendorf

WILMA

Martl 24.01.1993

Bild 25: WILMA - Wiederaufbereitungsanlage für PVC-Folien-Verschnitt

**Teilweise verschmutzter Verschnitt** wird in einer Schneidmühle vorvermahlen und in einem Wasch- und Trennprozeß mit Hilfe der Förderflüssigkeit so vorge-  
trennt, daß Bestandteile mit einem spezifischen Gewicht von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  ausgeson-  
dert werden. In zwei folgenden Hydrozyklonstufen werden dann die Fraktionen  
"Leichter als PVC" und "Schwerer als PVC" ausgesondert. Das so entstandene  
PVC-Gemisch ( $1,2 < \gamma < 1,5 \text{ g/cm}^3$ ) wird in einer Zentrifuge mechanisch getrock-  
net und anschließend thermisch getrocknet. In einer Feinmühle entsteht dann ein  
trockenes PVC-Mahlgut, das zur Weiterverarbeitung abgefüllt wird. Allein das  
**Waschen kostet 0,70 DM/kg Verschnitt** und im Extremfall sogar 2,50 DM/kg  
(wenn Kleber u. ä. dabei sind).

Die Dichtentrennung über Hydrozyklone erfordert keine Auflagen nach TA-Luft.  
Die in den Anlagen abgeschiedenen Reststoffe bilden ein vollkommen undefinier-  
bares Chemikaliengemisch.

Die Anschlußleistung beträgt 200 kW (aktuell 150 kW), benötigt werden ca. 30 t  
Dampf/h und 400 m<sup>3</sup> Wasser/h. Die noch nicht optimierte Anlage hat einen  
Durchsatz von 700 kg/h. Die Jahreskapazität beträgt 3 000 t – 4 000 t. Nach dem  
Absieben fallen ca. 10 % der Menge als Abfälle an.

Der Bau der Anlage erfolgte von Mai bis November 1992, anschließend erfolgten  
zwei Monate Einfahr- und Testversuche. Leitungs- und Zyklongeräusche sollen  
reduziert und zu große Vibrationen durch geeignetere Aufhängung beseitigt wer-  
den. Die Erbauer und Betreiber der Anlage sind bisher mit den Ergebnissen der  
Testversuche sehr zufrieden.

### ***Kein Recycling gebrauchter Folien in der Folienproduktion***

**Gebrauchte Folien werden derzeit in diesem Prozeß nicht verarbeitet.** Die  
gesamte verkaufte Produktionsmenge geht damit auf die Deponie, in die MVA,  
und wird zum Teil zu Mixed Plastics weiterverwertet.

## **7.5 Recycling von PVC-Produkten aus anteilig kleinen Sektoren**

Der Vollständigkeit halber sollen noch einige Produkte mit Recyclingpotential aufgeführt werden, deren Produktionsmengen jedoch von geringer Bedeutung sind. Die folgenden Ausführungen sind der Literatur entnommen.

### ***Flaschen aus PVC***

Die Menge an PVC-Flaschen ist in Deutschland sehr gering, ca. 10 000 t/a. 1990 hat sich die Deutsche Solvay Werke GmbH bereit erklärt, PVC-Flaschen zurückzunehmen und aus dem rezyklierten Material Kanal- und Abwasserrohre zu produzieren (*Härdtle et al., 1991*). Dies ist derzeit wegen des geringen Rücklaufs an Rohren noch möglich. Im Rohr-Sektor reicht das Aufnahmepotential zukünftig nicht einmal im brancheneigenen Konzept (vgl. Kapitel 7.2). Damit fehlt für die Flaschen ein brancheneigenes Materialrecycling-Konzept.

### ***PVC-Telefonkarten***

TELEKOM hat zusammen mit der Höchst AG ein Telefonkartenrecycling eingeführt. TELEKOM liefert die aus Sammelbehältern der Telefonzellen stammenden gebrauchten Telefonkarten kostenlos an das Hoechstwerk in Gendorf, in dem das Rezyklat gewonnen und stofflich weiterverarbeitet werden soll. Bei einem geschätzten Kartenverkauf von 40 Mio Karten und einem angenommenen vollständigen Rücklauf würde sich für 1994 eine PVC-Menge von 200 t ergeben (*Härdtle et al., 1991*). Eine andere Quelle nennt bei einer 100-prozentigen Erfassung der gebrauchten Karten eine Gesamtmenge pro Jahr von 30 t (*Halbekath/Moser, 1992*). Zwischen beiden Rücklaufmengen liegt ein Faktor sieben. Auch wenn die Menge gering ist, so ist das gewählte Verfahren gelungen: Unmittelbar nach Ende des Gebrauchs einer Karte besteht am Gebrauchsort in der Telefonzelle die Rückgabemöglichkeit.

Angesichts der großen Mengen PVC, für die kein Materialrecycling sichtbar ist, ist das ein Tropfen auf den heißen Stein.

### ***Scheckkarten aus PVC***

Rund 250 Filialen der Banken und Sparkassen nehmen alte PVC-Scheckkarten von ihren Kunden zurück und liefern sie an ein Recyclingunternehmen in Bösel.

Dort werden aus dem gewonnenen Regranulat Abwasserrohre, Blumenkübel, Plastikbänke und Bauprofile hergestellt (*Umweltmagazin, 1991*).

Im regionalen Bereich liefern die Geldinstitute die gesammelten Scheckkarten bei Hoechst Folien in Gendorf ab. Dort werden sie gemahlen und zu Bauschutzfolien und Bauprofilen weiterverarbeitet (*Wacker-Chemie, 1992*).

### ***Schallplatten aus PVC***

**Nicht verkaufte Schallplatten** werden seit 1992 vollständig rezykliert und zusammen mit den Produktionsrückständen zu neuen Schallplatten aufbereitet. Dies geschieht in einer Kooperation der Wacker-Chemie mit EMI-Elektrola und den Ruperti-Werkstätten in Altötting. EMI-Elektrola kauft das gewonnene Schallplatten-Granulat zurück und fertigt daraus neue Schallplatten. Einbußen bei der Klangqualität dieser Schallplatten sind nicht feststellbar (*Wacker-Chemie, 1992*).

**Für die große Menge der in Umlauf befindlichen Schallplatten ist keine Lösung für Materialrecycling in Sicht.**

## 8. Wesentliche Erkenntnisse aus praktischem PVC-Recycling

Es ist schwierig, den günstigsten Recyclingformen der Wieder- und Weiterverwendung entsprechende PVC-Mengen bzw. Produkte zuzuordnen. Es gibt langlebige Produkte aus PVC, deren "Recyclingaufwand in der Gebrauchsphase" gering ist. Das Materialrecycling als Produktionsabfallrecycling und Altstoffrecycling in Form der Wiederverwertung und teilweise der Weiterverwertung findet zunehmende Anwendung. In relevanten Mengen stammen die zur Wiederverwertung geeigneten PVC-Produkte aus dem Baubereich: Aus Fenstern, Rohren, Bodenbelägen und sehr eingeschränkt Folien werden üblicherweise wieder jeweils gleichartige Produkte hergestellt. Da die Rezyklate gebrauchten Materials bei den anspruchsvollen Produkten Fensterprofile, Rohre und Bodenbeläge jedoch stets im nicht sichtbaren bzw. nicht oberflächlich beanspruchten Bereich eingesetzt werden, gibt es keine echte Wiederverwertung. Der Einsatz von Rezyklaten in diesen Produkten stellt die erste Stufe von Downcycling dar. In allen Fällen müssen die Produktionsabfälle bzw. die Altprodukte als Ausgangsmaterial für die Rezyklate sortenrein, d. h. weitestgehend frei von Fremdstoffen sein. Die jeweilige Branche muß den gesamten Recyclingprozeß für ihre Produkte selbst organisieren und sich z. B. auch auf das eigene Land begrenzen, wie im Falle des Rohrrecyclings der Niederlande. Unter diesen Randbedingungen existieren dann ausreichende Bandbreiten für die Anforderungsprofile der neuen Produkte mit Rezyklatanteil. Die Verträglichkeit alter und neuer Stabilisierungsstoffe ist gegeben, durch Abmischen wie bei Neuware kann die jeweils gewünschte Qualität des Rezyklats eingestellt werden. Eine Mehrfachverarbeitung (*dreifach oder auch mehr*) scheint aus heutiger Sicht möglich, ohne das die Qualitätseigenschaften unzulässig absinken.

Die derzeit in der Praxis rezyklierten Mengen sind sehr klein, sie liegen zwischen 1 und 10 % der Produktionsmenge, im einzelnen:

- |                       |            |                                     |
|-----------------------|------------|-------------------------------------|
| • Fensterprofile      | 2 % – 5 %  | (Neuprodukte) im Aufbau: Altfenster |
| • Rohre (Niederlande) | 1 %        | (Altprodukte)                       |
| • Bodenbeläge         | 1,5 %      | (Altprodukte)                       |
| • Folien              | 10 % + 5 % | als Weiterverwertung (Neuprodukte)  |
| • Flaschen            | ?          |                                     |
| • Kabel               | ?          |                                     |

Aufsummiert ergeben sich damit derzeit mögliche Recyclingmengen in der BRD zwischen 30 000 und 40 000 Tonnen pro Jahr, überwiegend handelt es sich dabei bisher noch um Produktions- und Verarbeitungsabfälle, also um Recyclingware aus Neuprodukten. Dies ist wiederum die Größenordnung von den aus der Litera-

tur entnommenen Schätzungen für Recyclingmaterial, nämlich 50 000 Tonnen pro Jahr.

### 8.1 Technische Recyclingpotentiale auf der Basis von praxisnahen Demonstrationsanlagen und Testversuchen

In neuen gleichwertigen Recycling-Produkten wird der technisch mögliche Rezyklatanteil nach heutigen Erkenntnissen mit folgenden Bandbreiten angegeben:

	In der Literatur	diese Arbeit
• Fensterprofile	40 % bis ~ 70 %	60 %
• Rohre (dreilagig)	50 %	50 %
• Bodenbeläge	50 %	50 %
• Folien	10 % bis ~ 15 %	15 %

Die technische Machbarkeit muß noch in weiteren Pilot- und Demonstrations-Experimenten abgesichert werden, damit die notwendigen Garantieleistungen für Recyclingprodukte erbracht werden können und so reelle Marktchancen eröffnet werden können.

### 8.2 Abgeschätzte Recyclinganteile einer künftigen Produktion

Mögliche Recyclinganteile der Produktion lassen sich nur schwer abschätzen, da der zukünftige Markt für Rücklaufware und Neuware unbekannt ist; neben der Wirtschaftlichkeit eines Recyclingprozesses spielen möglicherweise Billigimporte und nicht bekannte Sättigungseffekte (z. B. durch Verlängerung der Gebrauchsdauer) eine Rolle.

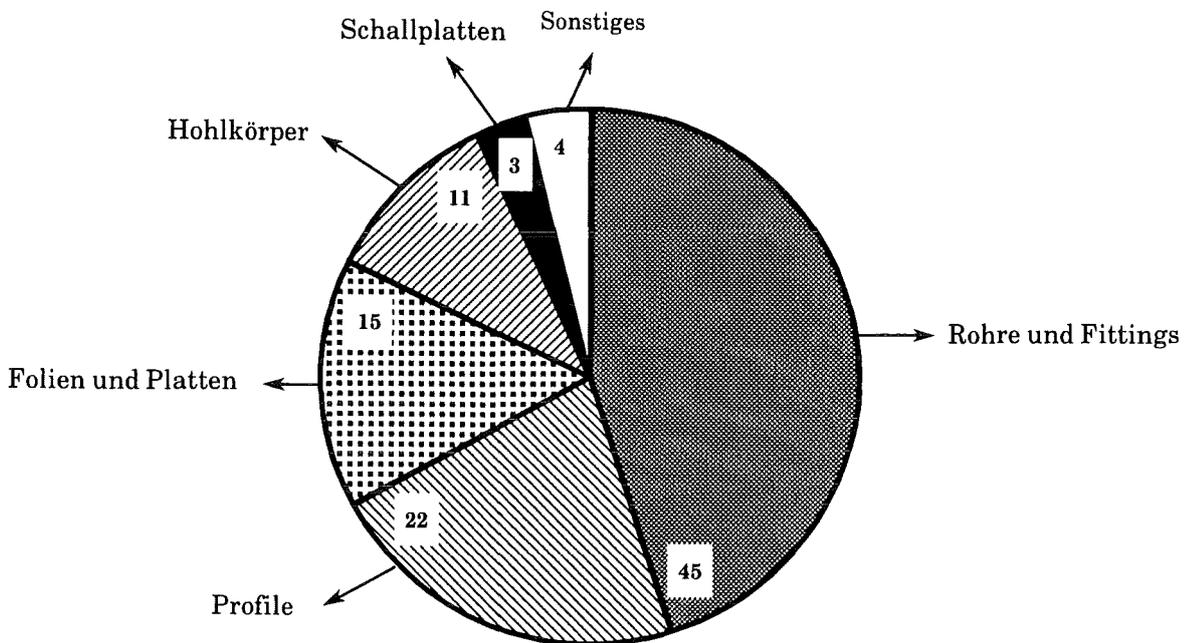
#### 8.2.1 Mengenanteile bei gleichbleibendem Verbrauchsverhalten auf Basis der gesamten Neuproduktion

Deshalb wird ein Gedankenexperiment angestellt, um die Größenordnung zukünftiger Rezyklatanteile an der Neuproduktion zu ermitteln. Es werden folgende Annahmen getroffen:

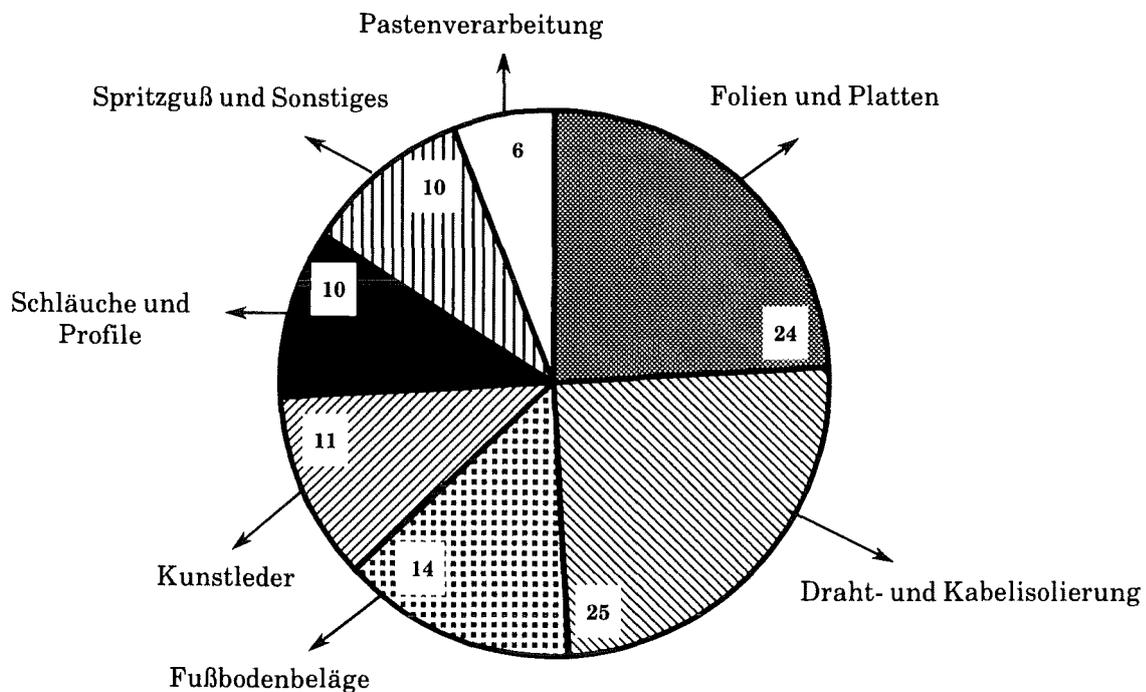
- In z. B. 10 Jahren von heute sind die Rücklaufmengen ausreichend groß, um die technisch möglichen Recyclinganteile auszuschöpfen.
- Die PVC-Produktion sei in 10 Jahren ähnlich der heutigen, das wären 1,5 Millionen Tonnen pro Jahr. PVC-Hart und PVC-Weich sollen sich im gleichen Verhältnis wie heute aufteilen, nämlich  $\frac{2}{3}$  Hart-PVC und  $\frac{1}{3}$  Weich-PVC.

- Die wesentlichen Produkte mit Recyclingpotential sollen in 10 Jahren die heutigen Mengenanteile an der Gesamtproduktion aufweisen (vgl. Bild 26), nämlich:

**PVC hart: Mengenanteil  $\frac{2}{3}$  (= 100 %)**



**PVC weich: Mengenanteil  $\frac{1}{3}$  (= 100 %)**



**Bild 26:** PVC-Produktpalette, Mengenanteile

- Fensterprofile: 22 % von 1,0 Mio t Hart-PVC = 220 000 t
- Rohre: 45 % von 1,0 Mio t Hart-PVC = 450 000 t
- Bodenbeläge: 14 % von 0,5 Mio t Weich-PVC = 70 000 t
- Folien und Platten: 15 % von 1,0 Mio t Hart-PVC = 150 000 t

Für die vermarktbareren Neuprodukte mit Rezyklatanteil (Recyclingware) bezogen auf die Gesamtproduktion der Produkte (Produktgruppen) werden folgende Prozentsätze angenommen:

- Fensterprofile: 50 % = 110 000 t
  - Rohre (drucklos): 20 % = 90 000 t
  - Bodenbeläge: 50 % = 35 000 t
  - Folien und Platten: 50 % = 75 000 t
- $\Sigma$  345 000 t

Mit den Annahmen zum Rezyklatanteil ergeben sich dann für die vier Produktgruppen folgende vermarktbareren Rezyklatmengen aus bereits gebrauchtem Material:

- Rezyklat bei Fensterprofilen 66 000 t = 30 % der Fenster gesamt
- Rezyklat bei Rohren 45 000 t = 10 % der Rohre gesamt
- Rezyklat bei Bodenbelägen ~ 18 000 t = 26 % der Bodenbeläge gesamt
- Rezyklat bei Folien und Platten ~ 11 000 t = 7 % der Folien + Platten gesamt (Neuware mit Rezyklatanteil).

Insgesamt sind es 140 000 Tonnen PVC-Rezyklate in 345 000 Tonnen PVC-Recyclingprodukten, das wäre in der Recyclingware ein durchschnittlicher Rezyklatanteil an gebrauchtem Material von rund 40 %.

Bezogen auf die gesamte Neuproduktion von 1,5 Mio Tonnen PVC-Produkten würde die *Gesamtmenge* der eingesetzten Rezyklate aus gebrauchtem Material rund 10 % ausmachen, bezogen auf den im Inland verbleibenden Anteil der Neuproduktion von 0,9 Mio Tonnen (Inlandverbrauch) wären es rund 16 %.

Bei gleicher Nachfrage müßte dann die *Neuproduktion* in den vier betrachteten Produktgruppen um die gleichen vorgenannten Prozentsätze *zurückgefahren* werden:

- bei Fensterprofilen: 30 %
- bei Rohren: 10 %
- bei Bodenbelägen: 26 %
- bei Folien und Platten: 7 %

Dieses Szenario basiert auf Annahmen mit Unsicherheiten, die nur mit größerem Aufwand teilweise quantifiziert werden könnten. Dies soll an dieser Stelle nicht geschehen, weil hier nur die Größenordnung des möglichen Recyclingpotentials für PVC-Produkte interessiert<sup>24</sup>).

### **8.2.2 Entwicklung der Mengenanteile der Hauptanwendungsbereiche auf der Basis gleichbleibenden Inlandverbrauchs**

Neuere Berechnungen der post-consumer-Abfälle (geschätzte Potentiale) der Kunststoffherstellenden Industrie für die Anwendungsbereiche Fenster, Bodenbeläge, Kabelummantelungen und Rohre sind in Tabelle 18 wiedergegeben. Es wird die Annahme zugrunde gelegt, daß die derzeitigen Endverbrauchsmengen gleichbleiben.

Aus der Tabelle erkennt man, daß die Potentiale von post-consumer-Abfällen (Zeile A) sehr unterschiedlich sind (1993: zwischen 5 % bei Rohren und bis 80 % bei Fußböden, 2010 zwischen 25 % bei Rohren und 90 % bei Fußböden) und die zeitliche Entwicklung dieser Potentiale ebenfalls sehr verschieden ist (von 5 % auf 25 % bei Rohren und von 80 % auf 90 % bei Fußböden).

Die nach heutigen Erkenntnissen technisch möglichen Rezyklatanteile sind entsprechend Abschnitt 8.1 in Zeile B der Tabelle eingetragen. Durch Vergleich mit den geschätzten Potentialen der post-consumer-Abfälle ergeben sich Untermengen (–) und Übermengen (+), siehe Zeile C in der Tabelle. Untermengen bei Rohren und bei Fensterprofilen bedeuten, daß bei diesen Produkten noch mehr Rezyklate verarbeitet werden könnten. Übermengen bei sonstigen Profilen und Fußböden müßten z. B. der Verbrennung zugeführt werden, ein Zwischenschritt über Materialrecycling in andere Produkte (z. B. Rohre mit geringeren Anforderungen) wäre möglich.

Bezieht man die aufsummierten Materialrecyclingpotentiale der wichtigsten (betrachteten) Anwendungsbereiche auf unterschiedliche Bezugsgrößen, dann ergibt sich in der zeitlichen Entwicklung folgendes Bild, Tabelle 19:

---

24) So geht die Kunststoffindustrie z. B. von einem Wachstum von 2 % p. a. für Fensterprofile und 1 % p. a. für Rohre aus, und rechnet über die nächsten Jahre nur mit einer relativ geringen Abfallmenge langlebiger Güter.

Tabelle 18: Materialrecycling von PVC, mittelfristige Entwicklung

A = berechnete Mengen (Schadhauser, 1994 a)

B = Annahmen auf der Basis von Experimenten

Bezug: gleichbleibender Inlandverbrauch

	Gesamte Neu-Produktion 1993	Bezugsgröße: Frischware Inland-Verbrauch 1993	A	post-consumer-Abfälle (Potentiale)					
			B	technisch möglicher Recyclatanteil					
			C	Untermenge (-), Übermenge (+)					
				1993		2000		2010	
	Menge	Anteil	Menge	Anteil	Menge	Anteil			
Rohre	314	286	A	13	5 %	30	10 %	71	25 %
			B	143	50 %	143	50 %	143	50 %
			C	- 130	45 %	- 113	40 %	- 72	25 %
Fenster-Profile	204	125	A	17	14 %	32	26 %	62	50 %
			B	75	60 %	75	60 %	75	60 %
			C	- 58	46 %	- 43	34 %	- 103	10 %
Sonstige Profile	314	286	A	68	54 %	87	69 %	111	87 %
			B	63	50 %	63	50 %	63	50 %
			C	+ 5	4 %	+ 24	19 %	+ 48	37 %
Kabel	125	103	A	45	44 %	62	60 %	75	73 %
			B						
			C						
Fußböden	85	83	A	66	80 %	66	80 %	75	90 %
			B	42	50 %	42	50 %	42	50 %
			C	+ 24	30 %	+ 24	30 %	+ 33	40 %
Summe		724	A	209	29 %	277	38 %	394	54 %

**Tabelle 19:** Zeitliche Entwicklung berechneter Potentiale von post-consumer-Abfällen, verschiedene Bezugsgrößen

	1993	2000	2010
<b>Berechnete Gesamtmengen der post-consumer-Abfälle (Potentiale)</b> [x 10 <sup>3</sup> t/a]	209	277	394
<b>Bezugsgrößen</b>	<b>Prozentuale Anteile</b>		
a) Frischproduktion der betrachteten Anwendungsbereiche nach Tabelle 18 [724 • 10 <sup>3</sup> t/a]	29 %	38 %	54 %
b) Inlandverbrauch, gesamte Frischproduktion [900 • 10 <sup>3</sup> t/a]	29 %	31 %	44 %
c) Frischproduktion Inland und Export [1,4 • 10 <sup>6</sup> t/a]	15 %	20 %	28 %

### 8.2.3 Obere Grenze für werkstoffliches Materialrecycling

Die vorstehenden Betrachtungen in den Abschnitten 8.2.1 und 8.2.2 machen folgendes deutlich:

Es muß deutlich unterschieden werden zwischen technisch möglichen Rezyklatanteilen in Produkten / Produktgruppen, verfügbaren Rezyklatmengen und berechneten / geschätzten Potentialen von Rezyklatmengen. Weiterhin muß die jeweilige Bezugsgröße klar definiert sein.

Die "quellenwirksame eingangsseitige Recyclingquote" ( $\alpha_A$ ) ist das Verhältnis aus rezykliertem Material und frischem Material eines neuen Produktes bzw. einer Produktgruppe. Bei  $n$  Produktionen ergeben sich  $(n - 1)$  Recyclingschritte. Die Recyclingquote ist maßgebend für Ressourcenschonung und Energieeinsparung.

Die "momentane abgangsseitige Recyclingquote" ( $\alpha_R$ ) ist das Verhältnis der in den Recyclingsprozeß gelangenden Menge zu der in die geordnete Entsorgung ge-

langenden Menge (erfaßte post-consumer-Abfälle). Sie ist für reale Recyclingprozesse von Bedeutung.

Mit Blick auf das strategische Ziel der Ressourcenschonung und Energieeinsparung ist die "quellenwirksame eingangsseitige Recyclingquote" maßgebend. Die Bezugsgröße ist also die Frischproduktion für den Inlandsverbrauch, weil hier nur die Recyclingmengen im Inland betrachtet werden.

Die jährliche Frischproduktion im Inland beträgt rund 0,9 Mt.

Aus Abschnitt 8.2.1 ergibt die Abschätzung, daß in ca. 10 Jahren von heute in den im Inland verbrauchten PVC-Produkten der durchschnittliche Anteil der eingearbeiteten Rezyklatmenge 16 % betragen könnte. Zur Vereinfachung der weiteren Betrachtungen wird einmal angenommen, daß es bei einer Reihe sehr günstiger Umstände (Eröffnung weiterer Produktgruppen für Recyclingware, Änderungen in der Produktpalette zugunsten von Produkten mit Recyclingpotential auf der Materialebene, Verbesserung der Marktchancen für Recyclingware, z. B. durch Änderung des Verbraucherverhaltens) möglich sein könnte, die durchschnittlichen Anteile der Gesamt-Recyclingmenge um den Faktor zwei zu erhöhen, also auf rund 30 % der gesamten im Inland verbrauchten Frischware.

Aus Abschnitt 8.2.2 ergibt sich, daß die technisch möglichen Rezyklatanteile der im Inland produzierten Frischware für die betrachteten Produkte über 50 % betragen könnten, bezogen auf die gesamte im Inland produzierte Menge wären es knapp 30 %.

Zusammenfassend ergibt sich mittelfristig (2000 – 2010) also folgendes Bild:

PVC-Frischproduktion im Inland:	~	900 000 t/a	=	100 %
In Neuprodukten eingearbeitete Rezyklate:	~	300 000 t/a	=	33 % ( $\frac{1}{3}$ )
Zu entsorgende Restmenge <sup>25)</sup> :	~	600 000 t/a	=	67 % ( $\frac{2}{3}$ )

Auch mittelfristig überwiegt die zu entsorgende Restmenge die durch Materialrecycling verwertbare Menge bei weitem.

---

25) Unter der Annahme, daß der Sättigungszustand bereits erreicht ist.

### **8.3 Bewertung des Materialrecyclings der vier wesentlichen betrachteten Produktgruppen**

Allgemein gültige Grundsätze sollten die folgenden sein: Das Recycling ist nur sinnvoll als integraler Bestandteil einer ökologisch orientierten Produktion mit realisierter Energie- und Ressourceneinsparung. Für einzelne Produktgruppen müßte von den jeweils betroffenen Herstellern ein wirklicher Stoff- und Produktkreislauf aufgebaut werden, der zu einer entsprechend den erzeugten Rezyklatmengen verringerten Neuproduktion führt. Dies würde eine neue Industriepolitik in den jeweiligen Branchen voraussetzen. Neuproduktion und Rezyklatproduktion dürften organisatorisch und betriebswirtschaftlich nicht mehr getrennt ablaufen, sondern nur in einem vollintegrierten Prozeß. Marktforschung, Markterschließung und Marktbedienung müßten für Neuware und Recyclingware gleichrangig betrieben werden. Das heute noch vielfach praktizierte Alibirecycling zur Aufrechterhaltung bzw. Ausweitung der Neuproduktion sowie teilweise unseriöse Reklame in diesem Zusammenhang müßten der Vergangenheit angehören.

#### **8.3.1 Fensterprofile**

Die Fensterprofile stellen nach den Rohren mengenmäßig die zweitwichtigste Produktgruppe dar. Ihre Marktanteile sind inzwischen mit denen der konventionellen Holzfenster vergleichbar. Funktionsqualität, Lebensdauer und Wartungsfreiheit sind ihre charakteristischen Eigenschaften. Rezyklatanteile im Bereich von 50 % sind voraussichtlich technisch und ökonomisch machbar. Hersteller und Verarbeiter in der BRD haben begonnen, eine Logistik für einen Recyclingprozeß aufzubauen. Mittelfristig (~ 10 Jahre) könnte die Neuproduktion um etwa ein Drittel zurückgefahren werden, das würde eine jährliche Einsparung von rund 70 000 Tonnen Neu-PVC für Fensterprofile bzw. eine Einsparung von rund 40 000 Tonnen Chlor bedeuten.

Wenn die bisherigen Recyclingaktivitäten für Fensterprofile von der betroffenen Industrie koordiniert und zielorientiert im Sinne der einleitenden grundsätzlichen Bemerkungen erfolgreich fortgesetzt werden können, dann werden maximal 50 % PVC-Fenster rezykliert. Die Deponierung, die Verbrennung oder andere aufwendige Entsorgungsverfahren könnten damit bis zum Erreichen des 50 %-igen Rücklaufs der Profile auch nach Gebrauch entfallen. Die bisher in den Stabilisatoren enthaltenen Umweltgifte Cadmium und Blei würden solange im Stoffkreislauf der Fensterprofile verbleiben und zunächst nicht weiter als Schadstoffe ubi-

quitär in der Umwelt verteilt werden bzw. in aufwendigen und kostspieligen Nachsorgeeinrichtungen aufkonzentriert werden müssen.

Überschüssige Rücklaufmengen gebrauchter Fenster, die nicht in neue Recycling-Fensterprofile eingearbeitet werden können, sollen nicht an anderer Stelle verwendet werden, damit die Verschleppung schwermetallhaltiger Additive ausgeschlossen werden kann.

Für diese in weiterer Zukunft anfallenden restlichen 50 % gibt es noch kein Verwertungskonzept auf der Materialebene, nur die HCl-Rückgewinnung.

### **8.3.2 Rohre**

Die mengenmäßig bedeutendste PVC-Produktgruppe sind Rohre im Baubereich. Der Anteil druckloser Rohre (Abwasser-, Kabelschutz-, Drän- und Sicker-Rohre) an der gesamten PVC-Rohrproduktion ist  $\sim 70\%$ . Ein großer Teil aller PVC-Rohre ist unterirdisch verlegt, so daß hier auch Brände mit Freisetzung von Chlorwasserstoff und Dioxinen ausgeschlossen werden können. Die Rücklaufmenge wird immer kleiner sein als die Produktionsmenge, weil ein Teil der unterirdisch verlegten Rohre vorwiegend aus ökonomischen Gründen (Ausgraben wäre zu teuer) am Ort ihrer Verwendung auch ihr Endlager finden werden. Der technisch realisierbare Rezyklatanteil ist bei drucklosen Rohren mit 50 % wiederum relativ hoch. Das Entwicklungspotential von Recyclingmaterial in Druckrohren ist jedoch sicher noch nicht ausgeschöpft. Die absolute Menge von Rezyklat aus Rohren könnte die Größenordnung von 50 000 Tonnen pro Jahr erreichen. In diesem Umfang könnte jährlich Neu-PVC bei der Rohrherstellung eingespart werden und damit auch rund 20 000 Tonnen Chlor. Abgesehen von den im Boden verbleibenden Rohren gibt es für die weit überwiegende Menge von PVC-Rohren, außer der HCl-Rückgewinnung, derzeit kein Verwertungskonzept.

### **8.3.3 Bodenbeläge**

Auch in neue Bodenbeläge lassen sich 50 % Rezyklat ohne Qualitätseinbuße einarbeiten. Würden die Produktion von Neuware und Recyclingware organisatorisch und betriebswirtschaftlich integriert, dann könnten Rezyklatmengen von rund 20 000 Tonnen pro Jahr die Neuproduktion von PVC für Bodenbeläge entsprechend verringern bei gleichzeitiger Einsparung von 8 000 Tonnen Chlor (auch hier sind also nennenswerte Energie- und Ressourceneinsparungen möglich und

insofern ist das Recycling von Fußbodenbelägen sinnvoll). Für etwa die halbe Menge der PVC-Bodenbeläge gibt es außer der HCl-Rückgewinnung kein Verwertungskonzept.

#### **8.3.4 Folien**

Das Recycling von gebrauchten Folien zu neuen, gleichwertigen Folien wird nur in Ausnahmefällen möglich sein. In der Regel wird das Rezyklat gebrauchter Folien in dickwandigen Profilen und Platten Verwendung finden, dies wäre dann Recycling im Sinne einer Weiterverwertung. Damit könnte z. B. im Baubereich die Produktion von Neuware ohne Rezyklatanteil reduziert werden. Hier sind insbesondere Qualitätsfragen noch offen.

Außer der HCl-Rückgewinnung gibt es noch kein tragfähiges Konzept.

## 9. Kosten für Neu-PVC und Recycling-PVC

Die folgenden Daten stammen aus einer Kostenübersicht, die *Halbekath/Moser, 1992* aus verschiedenen Quellen zusammengestellt haben:

<i>Neu-PVC</i> (S-PVC)	Rohrqualitäten	1,05 – 1,20 DM/kg
	Folienqualitäten	1,20 – 1,30 DM/kg

Dies sind Durchschnittsmarktpreise (Stand Februar 1992) bei Großverbrauch für Naturmaterial in 20 t -Ladungen (*KI 05.03.1992, S. 3*).

<i>Standardkunststoff-Abfälle PVC</i>	weich transparent	0,30 DM/kg
	weich bunt	0,15 DM/kg
	hart transparent	0,30 DM/kg
	hart bunt	0,10 – 0,15 DM/kg.

Diese Preise (Stand November 1991) wurden für Abschlüsse zwischen Sortierern bzw. Händlern einerseits und Weiterverarbeitern andererseits genannt. Die Notierungen beziehen sich auf Ballen ab Station in großen Mengen (20 t) (*Ewid, Nr. 24, 1991*).

Zusammen mit dem Minimalansatz für die Aufarbeitung dieser (Produktions-) Abfälle (z. B. Mahlen) in Höhe von 200 – 300 DM/t (*Tötsch / Gaensslen, 1990*) ergibt sich für das **Rezyklat sortierter PVC-Abfälle** 0,35 – 0,60 DM/kg (*Halbekath/Moser, 1992*).

*Berndt et al, 1991* haben die Kosten von **Kunststoffverkaufsverpackungen** im dualen System in folgender Größenordnung ermittelt:

- Sammeln 0,50 DM/kg
- Sortieren 1,75 DM/kg
- Verwerten 1,20 DM/kg.

Rezyklat von Kunststoffverpackungsmüll aus Haushalten kostet somit ca. 3,00 bis 3,50 DM/kg.

Auf eine kleine Anfrage im Deutschen Bundestag gab die Bundesregierung zu den Kosten von Recyclingkunststoffen und neuen Kunststoffen folgende Antwort (*Deutscher Bundestag, 1992*):

Umfragen bei der betroffenen Wirtschaft ergaben für ein bestimmtes Hart-PVC folgende Angaben:

## Kosten

- Preis für Primärmaterial aus Inlandproduktion 1,20 DM/kg
- Preis für Primärmaterial aus ausländischer Produktion 0,90 DM/kg
- Preis für Sekundärmaterial aus sortenreinen Industrie- oder Gewerbeabfällen 1,40 DM/kg
- Preis für Sekundärmaterial aus vermischten und verschmutzten Haushaltsabfällen ca. 3,00 DM/kg bis 3,50 DM/kg.

Nach der neuen "Preisliste DSD Duale System Deutschland" wird ab 01.10.1993 für **Kunststoffverpackungen** undifferenziert 2,61 DM/kg berechnet (DSD, 1993). Dies haben Hersteller für ihre Verpackungen zu bezahlen, mit denen sie die Produkte in den Handel bringen.

Die momentane wirtschaftliche Situation bei der Schaffung neuer Materialkreisläufe in der Automobilindustrie wird am Beispiel von Kunststoffen wie folgt dargestellt (Franze, 1993):

### Anteile des Gesamtaufwandes zur Rezyklatherstellung

- Demontage und sortenreine Trocknung: ~ 50 %
- Logistik (Sammlung, Transport, . . .): ~ 20 %
- Einfache Aufbereitung zu Kunststoffreganulat mit Mindest-Eigenschaftsprofil (derzeit ca. 1,50 DM/kg): ~ 33 %

Die Aufbereitungskosten für Rezyklate mit definiertem Eigenschaftsbild (vergleichbar mit Neuware) liegen doppelt so hoch bei ca. 3,00 DM/kg.

Der Gesamtaufwand zur Schaffung neuer Kunststoffkreisläufe (Demontage, Aufbereitung, Logistik . . . ) bewegt sich derzeit günstigstenfalls zwischen 3 und 4 DM/kg.

Die eigenen Untersuchungen (diese Arbeit) ergaben folgende Kostenangaben:

Die von Hüls-Troisdorf hergestellten **Fensterprofile mit Recyclinganteil** werden gegenwärtig 20 % billiger verkauft als Neuprofile.

Die niederländische Firma Wavin in Hardenburg nannte im Dezember 1992 für **PVC-Rohre** folgende Preise:

### Kostenbilanz für Rezyklate:

- Altmaterial in Eingangshalle (20 + 7) 27 Cents / kg
- Recycling (Energie, Transport, Arbeit, Miete ...) 40 Cents / kg
- Mikronisieren (Pulverisieren, Granulieren) 15 Cents / kg
- Summe** 82 Cents / kg

**Preis für Neuware** 125 Cents / kg

Die Frima Höchst / Werk Gendorf nannte im Januar 1993 folgende Preise für PVC-Folien:

• Rohstoffkosten (Ostländer)	0,90 DM/kg	–	0,95 DM/kg
• frische Folie	Ø 3,80 DM/kg	–	4 DM/kg
• für Rezyklat	Ø 1,80 DM/kg	–	?
• Mahlen	0,15 DM/kg	–	0,20 DM/kg
• Aufbereitung	0,50 DM/kg		

Zusammenfassend kann man feststellen:

- PVC-Rezyklate aus sortenreinen Produktions- und Verarbeitungsabfällen sind halb so teuer bis ähnlich teuer wie Neuware.
- PVC-Rezyklate aus Altmaterial (Rohre) Kosten rund ein Drittel weniger als Neuware.
- PVC-Rezyklate aus vermischten Abfällen können bis zu 300 % teurer als Neuware sein.

Das Recycling sortenreiner PVC-Abfälle ist also auch ökonomisch sinnvoll. Das Recycling vermischter PVC-Abfälle müßte vom Verbraucher so stark subventioniert werden, daß sich dieser Weg voraussichtlich von selber verbieten wird; außerdem führt dieser Weg zu minderwertigen Produkten mit einem sehr begrenzten Markt.

## **10. Alternative Programme zum Materialrecycling**

Wie obige Ausführungen zeigen, könnte das Materialrecycling (sortenreine Altprodukte werden als Rezyklat in neue Recycling-Produkte eingearbeitet) im Mittel rund 16 %, vielleicht auch einmal das Doppelte (32 %), also rund ein Drittel der PVC-Neuproduktion (Inland) abdecken.

Es würden also im Mittel mindestens 66 %, also rund zwei Drittel der Neuproduktion (Inland) alternativ entsorgt werden müssen. Hierfür kommen nur polymeraufspaltende Verfahren in Frage, nämlich chemische Verfahren oder die Verbrennung. In Abbildung 6 sind in einem Flußdiagramm die praktizierten und die denkbaren Möglichkeiten des Recycling von Polymeren dargestellt; das Diagramm stammt von der Firma Höchst, Gendorf.

Bisherige Diskussionen und Untersuchungen zeigen, daß voraussichtlich nur die Hydrierung und die Verbrennung aus technischer Sicht eine praktische Bedeutung erlangen könnten. Deshalb soll an dieser Stelle nur auf diese beiden Möglichkeiten eingegangen werden.

### **10.1 Hydrierung**

Beim chemischen Recycling werden die langen Molekülketten der Kunststoffe aufgebrochen und mit Wasserstoff abgesättigt (hydriert).

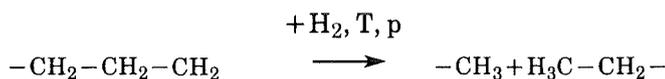
In Bild 27 ist das chemische Grundprinzip der Hydrierung dargestellt (*Rauser, 1992*). Die aliphatischen und aromatischen Strukturbestandteile stehen für Polyolefine und Polystyrol. In Kombination mit Heteroatomen wie Chlor (z. B. PVC), Stickstoff (z. B. Polyamid), Sauerstoff (z. B. Polyester) und Schwefel (z. B. vulkanisierte Kunststoffe) stellen sie die Variationsbreite der modernen Kunststoffe dar. Bei den Bedingungen der Hydrierung (hoher Druck, hohe Temperatur) werden die Makromoleküle zu flüssigen und gasförmigen Zwischenprodukten gespalten. Die Bruchstellen reagieren mit Wasserstoff unter Absättigung. Die Heteroatome Chlor, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel werden zum größten Teil abgespalten und in ihre Wasserstoffverbindungen überführt. Das Ölprodukt ist weitgehend frei von diesen Elementen.

Ein Pilotversuch in der Kohleverflüssigungsanlage der VEBA Oel AG in Bottrop hat gezeigt, daß Kunststoffe aus der DSD-Mischfraktion wieder zu ihrem Ausgangsprodukt Erdöl zurückverwandelt werden können (*ENTSORGA, 1992*). Die

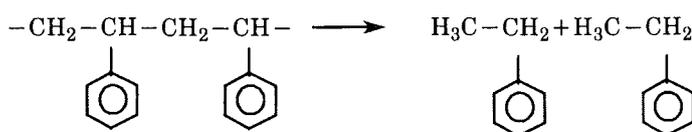
Kohle-Öl-Anlage kann pro Stunde rund 23 Tonnen Schweröl verarbeiten. Hiervon wurden bei Versuchen fünf Tonnen durch Kunststoffe ersetzt. Die daraus erstellte Maische hatte einen Zumischgrad von acht Prozent. Die VEBA-Manager hoffen, daß ihre Techniker diesen Anteil auf 22 % steigern können. Die Ausbeute des hydrierten Öls aus der DSD-Fraktion lag in den Versuchen bei 98 %. Verbleibende zwei Prozent Reststoffe, meist Chlor aus PVC, können mit zugesetzter Natronlauge zu Salzen ausgefällt werden. Das angelieferte Kunststoffmaterial muß relativ sauber sein. Für den Testverlauf wurde es in Vorbereitung für die Hydrierung gewaschen und granuliert. Verschmutzte Kunststoffe sind schlecht zu hydrieren. Über die voraussichtlich hohen Kosten der Hydrierung werden noch keine konkreten Aussagen gemacht, mit Sicherheit werden sie die Gebühr für den grünen Punkt erhöhen.

**Heteroatomfreie Kunststoffe**

Typ Polyolefine,  
z.B. Polyethylen

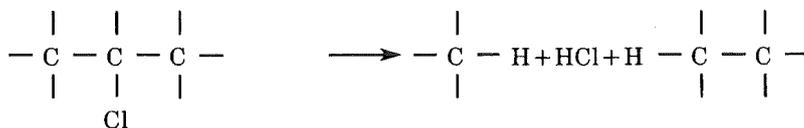


z.B. Polystyrol

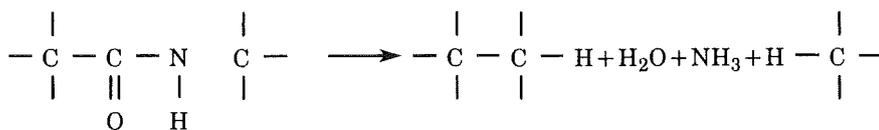


**Heteroatomhaltige Kunststoffe**

Typ chlorhaltige Kunststoffe,  
z. B. PVC  
(auch Cl-kontaminierte Altöle)

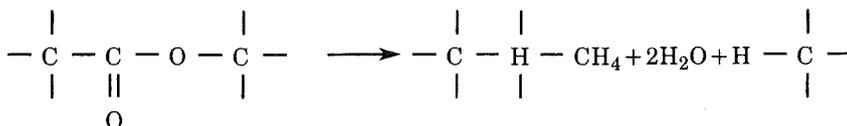


Typ stickstoff- / sauerstoffhaltige Kunststoffe,  
z. B. Polyamid

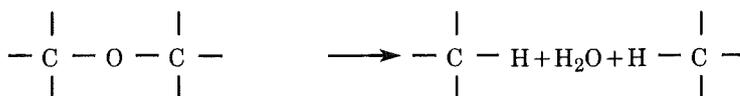


Typ sauerstoffhaltige Kunststoffe

- z. B. Polyester



- z. B. Epoxidharze



**Bild 27:** Grundprinzip der Hydrierung von Massenkunststoffen (Rauser, 1992)

Ihre Grenzen findet die Hydriertechnik darin, daß sie wirtschaftlich nur in der Nachbarschaft von Raffinerien betrieben werden kann. Diese sind zum einen Lieferant eines Inputs (Vakuurrückstandsöle) und zum anderen Abnehmer des synthetischen Hydrierprodukts (Syncrude). Auf diese Weise werden lange Transportwege vermieden. Die wesentliche Begrenzung besteht aber darin, daß die Hydrierung ausschließlich für Kohlenwasserstoffverbindungen verwendbar ist. Metalle und sämtliche anorganischen Verbindungen scheiden von vornherein aus. So erwies sich z. B. der Autoschredderleichtmüll als weniger geeignet für dieses Verfahren, weil sich der Anteil an Metallen und anorganischen Verbindungen als zu hoch erwies (VDI, 1992).

Die Hydrierung für nicht werkstofflich verwertbare PVC-Abfälle ist nicht das Ziel der PVC-Industrie, weil die Hydrierung Öl-orientiert ist. Die PVC-Industrie möchte Chlorwasserstoff für die Oxychlorierung zu neuem PVC zurückgewinnen und hat deshalb Studien zur Monoverbrennung und Niedertemperaturpyrolyse in Auftrag gegeben (Eckstein, 1993).

### 10.2 Verbrennung von PVC mit HCl-Rückgewinnung

In der chemischen Industrie werden Überlegungen dazu angestellt, ob die Verbrennung von PVC-Abfällen (Altprodukte) in speziell dafür konstruierten Anlagen machbar und wirtschaftlich ist.

Im Rahmen der Konzipierung einer Großanlage für HCl-Recycling wurden folgende Mengen abgeschätzt (Hornig, 1994):

• PVC-Produkte in der Anwendung	1994: ~ 18,5 Millionen Tonnen
• PVC-Produkte in der Anwendung	2010: > 30 Millionen Tonnen
• Rücklaufmenge (Hochrechnungen)	1994: 680 kt/a
• Rücklaufmenge (Hochrechnungen)	2000: ~ 800 kt/a
• Verwertung (werkstoffliches Recycling und MVA's)	1994: 200 kt/a
• Entsorgungslücke	1994: 500 kt/a
• Entsorgungslücke	2000: 600 kt/a

(Rein-PVC-Anteil 68 %)

Auf der Basis eines von Wacker 1992 ausgearbeiteten Verfahrenskonzeptes und im Auftrag der AgPU wurde von den Anlagenherstellern *Sulzer-Escher-Wyss*,

Sulzer und Steinmüller im Mai 1993 eine detaillierte technische Studie fertiggestellt 26).

Das Grundkonzept "HCl-Recycling aus PVC" ist danach durch folgende Punkte gekennzeichnet:

1. Abfall-PVC wird zerkleinert, zunächst an einem Standort eines VC-Herstellers angeliefert und in einer Großanlage unter HCl-Rückgewinnung verbrannt. Der freigesetzte Chlorwasserstoff wird in die HCl-Schiene des VC-Verbundsystems eingeschleust und dient in Folgeschritten der erneuten PVC-Erzeugung.
2. Die Chlorwasserstoff-Umsetzung erfolgt in einer Oxy-EDC-Anlage, deren Kapazität um diese Menge erhöht werden muß, entsprechend wird die Direktchlorierung zurückgefahren (siehe Bild 9). Auf der Chlorseite kann damit eine entsprechende Menge der Frischproduktion aus der Elektrolyse ersetzt werden 27).
3. Die bei der Verbrennung frei werdende Energie wird zur Erzeugung von Dampf bzw. Strom genutzt.
4. Mit dem Verfahren ist der Abbau von Elektrolyse-Kapazität gekoppelt. Hiermit kann in der Gesamtbilanz der Strombedarf erheblich reduziert werden.
5. Die Anlagekapazität wird aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen auf ca. 90 kt/a HCl festgelegt, was einem Abfall-PVC-Einsatz von ca. 250 kt entspricht. Dann könnte eine Elektrolyseanlage stillgelegt werden.
6. Die feste Reststoffmenge kann bei einem Einsatz von 250 kt/a PVC, 5 % Braunkohle, 10 % Sand und etwas Löschkalk auf 74 kt/a reduziert werden.

Wichtige Grundaussagen der Studie sind:

1. Das geplante Verfahren ist ohne Abstriche realisierbar.
2. Das Verfahren stützt sich weitgehend auf bekannte und erprobte Technologien. Damit soll eine Pilotanlage übersprungen werden.

Die Investitionskosten werden mit 460 Mio. DM angegeben. Hinzu kommen Investitionen für die Anpassung der Oxy-EDC-Anlage. Gleichzeitig vermindert sich die Auslastung der Direktchlorierungsanlage.

---

26) Im Juli 1994 wurde im Rahmen einer Vortragsveranstaltung "PVC-Recycling" im KfK über wesentliche Ergebnisse dieser Studie vorgetragen (Hornig, 1994).

27) Gleichzeitig muß auch auf die entsprechende Menge Natronlauge verzichtet werden können.

Die unternehmerische Entscheidung für einen Standort und den Bau einer HCl-Rückgewinnungs-Anlage fehlt bisher, weil vorrangig drei Fragen zu klären sind:

- PVC-Abfallverfügbarkeit
- Finanzierung
- Partnerbeteiligung.

Die Abfallmengenverfügbarkeit wird von der chemischen Industrie in diesem Zusammenhang als "dominierende Einflußgröße" bezeichnet, weil die PVC-Industrie die von ihr hochgerechneten Mengen im Abfall zur Zeit nicht identifizieren und einsammeln kann.

Die dahinter stehenden Fragen dürften aber lauten:

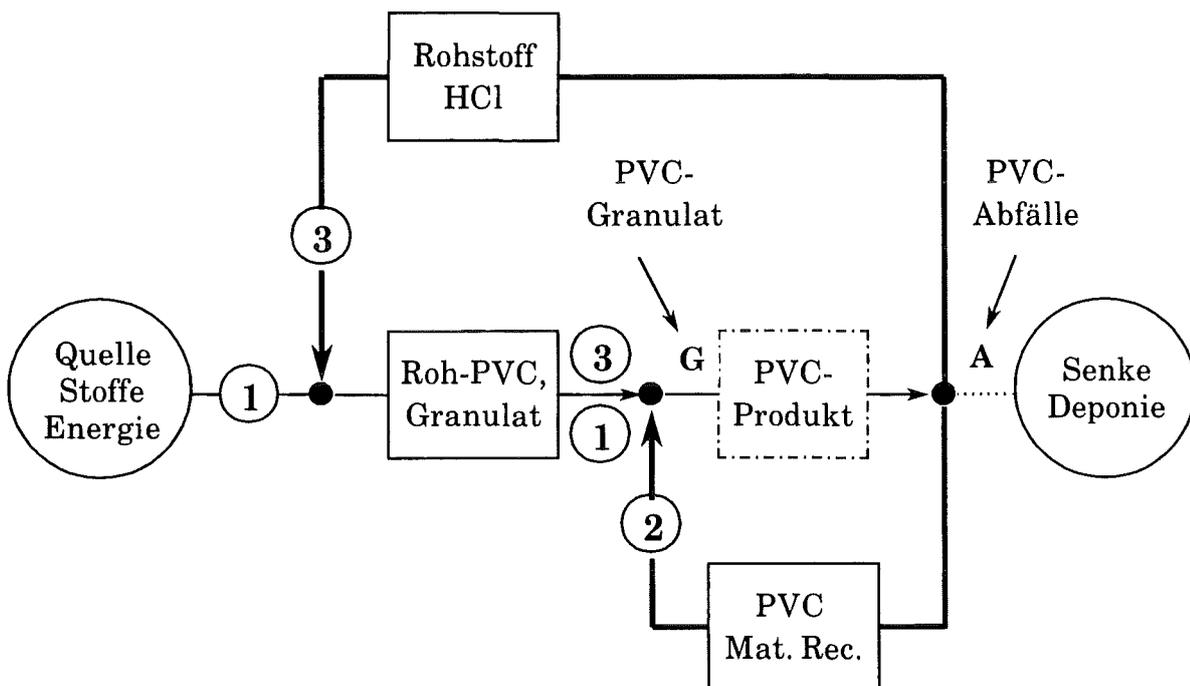
- Wer macht PVC-Abfälle am Eingang der HCl-Rückgewinnungsanlage in aufbereitetem Zustand verfügbar und wer bezahlt dies?
- Wer bezahlt das Hauptprodukt der aufwendigen Anlage, die sehr teure Salzsäure?

Nach den Vorstellungen der AgPU würde die PVC-Monoverbrennungsanlage von einer chemischen Verwertungsgesellschaft betrieben, deren Eigentümer die in der AgPU vereinten PVC-Hersteller und -Verarbeiter sind. Verarbeiter oder Vertreter sollen zur Finanzierung eine Lizenz zur Rücknahme und Verwertung ihrer PVC-Produkte erwerben (*Eckstein, 1993*). Dieses Konzept wurde inzwischen von den PVC-Verarbeitern abgelehnt (*Hornig, 1994*).

## 11. Kostenschleifen – mögliche Problemlösung

Die folgenden *Ausgangsbedingungen* liegen den Überlegungen zugrunde:

- Die Deponiekosten sind hoch und steigen weiter. Zukünftig wird die Ablagerung von PVC auf Deponien reduziert (TA-Siedlungsabfall). Deshalb muß und kann sich insbesondere bei Massenprodukten eine Kreislaufwirtschaft mit unterschiedlichen Recyclingkreisen entwickeln. So kann eine Deponiestreckung erreicht werden.
- Mögliche Recyclingkreise für PVC sind die **Schleifen 2** (Materialrecycling, Mat. Rec.) und **3** (HCl-Recycling) mit den Kosten  $K_2$  und  $K_3$  für ihr Endprodukt PVC-Granulat am Knoten G (Bild 28).
- Der Recyclingkreis **2** ist teilweise erprobt, die Kosten  $K_2$  basieren auf praktischen Erfahrungen, sie liegen im Bereich  $K_2 = (0,5 \dots 1,5) \cdot K_1$ . Die Kosten für Granulat aus 100 % Frischmaterial  $K_1$  dienen als Bezugsgröße.



- Weg 1** = Granulat aus Primärrohstoffen  
**Weg 2** = Granulat aus sortenreinen PVC-Abfällen  
**Weg 3** = Granulat aus HCl-Rückgewinnung

**Bild 28:** PVC-Recyclingkreise

Im Vergleich zu den bei verschiedenen Produktgruppen relativ geringen Kosten für das sortenreine Materialrecycling als polymererhaltendes Verfahren werden die Kosten der thermischen Behandlung als polymeraufspaltendes Verfahren (Pyrolyse, Verbrennung) voraussichtlich höher sein.

– Der Recyclingkreis 3 ist untersucht worden. In drei Studien wurden dafür Kosten zwischen 1,00 und 1,50 DM/kg PVC abgeschätzt (*Eckstein, 1993*). In der Studie zur HCl-Rückgewinnung (Sulzer-Escher-Wyss, Sulzer, Steimüller) werden folgende Kosten genannt (*Hornig, 1994*):

• Verbrennungskosten bei Vollaustattung und 15 %-iger Kapitalrendite:	650 DM/t Abfall-PVC
• VC-Verbund-Anpassungskosten:	50 – 100 DM/t Abfall-PVC
<b>Abgabepreis (standortneutral) <math>\Sigma</math>:</b>	<b>700 – 750 DM/t Abfall-PVC</b>
<b>Logistikkosten</b>	<b>285 DM/t Abfall-PVC</b>

Die Entsorgungskosten über den Verbrennungsweg liegen danach höher als die Kosten des Materialrecycling. Während das Materialrecycling mit diesen Kosten bereits zu verarbeitbarem Granulat führt, müssen auf dem HCl-Recyclingweg nochmals mindestens Kosten gleicher Höhe von 700 – 750 DM/t Abfall-PVC aufgewendet werden, weil das PVC zunächst neu produziert werden muß. Damit ist absehbar, **daß das PVC über den HCl-Recyclingpfad teurer als Frisch-PVC werden wird**. Die Kosten für Granulat  $K_3$  ergeben sich danach zu:  $K_3 = (1,0 \dots 2,0) \cdot K_1$ . Bei der Realisierung des sehr aufwendigen Recyclingkreises dürften sich die Kosten  $K_3$  eher weiter erhöhen.

– ***Aus heutiger Sicht scheint es möglich, das Materialrecycling schneller in eine wirtschaftliche Gewinnzone zu führen als das Rohstoffrecycling.***

Ein Vertreter der European Vinyls Corporation International SA / NV stellt in diesem Zusammenhang zu dem Thema "PVC-Recycling – Möglichkeiten und Grenzen" u. a. fest (*Bühl, 1992*):

**"Die eigentliche Herausforderung beginnt jetzt, wo der Gesetzgeber Quoten und damit den Durchsatz großer Mengen fordert. Hierzu werden finanzielle Aufwendungen für Logistik und Recyclingkapazitäten in Milliarden DM Höhe benötigt, die die Kunststoffindustrie allein nicht aufbringen können. Ohne Kostenverteilung wird es ein wirtschaftlich sinnvolles Recycling für die Massenkunststoffe nicht geben. Neben Wettbewerb in der Vermarktung ihrer Kunststoffe ist die Industrie nun zur Gemeinsamkeit bei der Lösung der Recyclingaufgaben aufgefordert, insbesondere was deren Finanzierung betrifft".**

Übrig bleibt deshalb die Frage: Wie wird in Zukunft der größte Teil der PVC-Altprodukte entsorgt und wer trägt dafür die Kosten?

Die Entsorgung von derzeit im Umlauf befindlichen 18,5 Mt Alt-PVC <sup>28)</sup> über HCl-Recycling würde bei Preisen um 1 DM/kg 18,5 Milliarden DM kosten. Jedes Jahr kommen im Inland rund 1,0 Mt PVC neu in Umlauf, und damit ergeben sich künftige zusätzliche Entsorgungskosten von einer Milliarde DM pro Jahr. Weil diese Kosten in die Produktpreise von Neuware eingerechnet werden müssen, verändert sich dadurch die ökonomische Position von PVC. Dabei ist bereits berücksichtigt, daß auch auf Konkurrenzprodukte in Zukunft höhere Entsorgungskosten zukommen.

### Mögliche mittelfristige (~ 10 Jahre) Entwicklung:

#### *Materialrecycling*

Das sortenreine Materialrecycling im Produktionsprozeß ist Stand der Technik, es wird schon lange praktiziert und weiter ausgebaut. Auf die gleiche Weise kann auch *sortenreines* Abfall-PVC wieder in Neuprodukten verarbeitet werden. Durch den weiteren Aufbau und Ausbau einer geeigneten Rückführlogistik könnte mittelfristig *ein Drittel* des Stoffstromes sortenreines Abfall-PVC am Knoten A in den *Materialrecyclingkreis* fließen. Die Anteile der Produktgruppen an diesem Stoffstrom werden unterschiedlich hoch sein. Dabei sind die technischen Voraussetzungen in einigen Fällen günstig (Fenster, Rohre, Bodenbeläge) und in anderen schwierig (Folien). Darüber hinaus ist die Wirtschaftlichkeit bereits für einige Sektoren gegeben bzw. absehbar. Mit der Annahme, daß die gesamte PVC-Abfallmenge 0,9 Mt/a beträgt und die Bezugskosten  $K_1 = 1\,000$  DM/t frisches PVC-Granulat aus Primärrohstoffen betragen, könnte eine gewinnbringende Tätigkeit im Materialrecyclingkreis im günstigen Fall in Höhe von rund 150 Millionen DM nützen. Im ungünstigen Fall sind dagegen Aufwendungen in ähnlicher Größenordnung denkbar:  $\Delta K_{(1-2)} = \frac{1}{3} \cdot 0,9 \cdot 10^6 \cdot (1 - (0,5 \dots 1,5)) \cdot 10^3 = + 150 \text{ Mio DM} \dots - 150 \text{ Mio DM}$ .

#### Fazit:

*Der Teilkreislauf 2 (Materialrecycling) sollte weiter auf- und ausgebaut werden. Stoffe, Energie und Kosten würden eingespart, deshalb sollte dieser Kreislauf von Wirtschaft und Politik gefördert werden.*

---

28) ADL hat errechnet, daß sich aktuell ca. 18,5 Mio. t PVC-Produkte in der Anwendung befinden (Hornig, 1994).

### ***Rohstoffrecycling***

Zwei Drittel der PVC-Abfälle können mittelfristig nicht in dem Recyclingweg 2 aufgenommen werden, im betrachteten Zahlenbeispiel wären das 600 000 t/a. Wenn die technischen Voraussetzungen für einen Recyclingweg 3 geschaffen werden könnten, kann die deutlich größere Menge PVC-Abfälle jedoch erst auf diesem Weg abfließen, wenn zusätzlich die Kostenfrage gelöst werden kann.

Die nicht gedeckten jährlichen Mehrkosten des über den Rohstoff-Recyclingweg 3 erzeugten PVC-Granulats in bezug auf PVC-Granulat aus Primärrohstoffen können zu  $\Delta K_{(3-1)} = \frac{2}{3} \cdot 0,9 \cdot 10^6 \cdot ((1 \dots 2) - 1) \cdot 10^3 = \pm 0 \dots 600$  Mio DM abgeschätzt werden. Unter optimistischen Annahmen ließe sich auch der Rohstoffrecyclingweg erschließen. Jedoch deuten die derzeit diskutierten Kosten darauf hin, daß das Abfließen der PVC-Abfälle auf diesem Weg wesentlich stärker blockiert ist als auf dem Materialrecyclingweg.

Nur eine schrittweise Anhebung der Kosten  $K_1$  (Granulat-Frischproduktion aus Primärrohstoffen) auf das Kostenniveau  $K_3$  könnte den Rohstoff-Recyclingweg 3 öffnen. Ein Instrument dazu wären Energiesteuern mit Kompensation an anderer Stelle, z. B. beim Faktor Arbeit (*DIW-Studie, 1994*).

Nach Erreichen der Kostenbeziehung ( $K_3 \geq K_1$ ) müßte der Weg 3 (Rohstoffrecycling) nicht mehr in Konkurrenz zum Weg 2 (Materialrecycling) gesehen werden, sondern als sinnvolle Ergänzung. In den Weg 3 würden nur noch solche PVC-Abfälle fließen, die der Weg 2 nicht mehr aufnehmen kann. Die relative Kostenentlastung des Weges 2 würde diesen zusätzlich befördern und die PVC-Produktpalette zu Produkten mit hohem Materialrecyclingpotential verschieben.

#### **Fazit:**

*Nur durch höhere Preise für PVC-Granulat aus Primärrohstoffen kann das Rohstoff-Recycling wirtschaftlich werden. Hier ist kein technisches Problem zu lösen, sondern die politische Frage zu entscheiden, ob dieses Recycling gewollt wird.*

Zusammenfassend kann man feststellen:

- PVC-Materialrecycling funktioniert, es ist energie- und rohstoffsparend sowie zum Teil schon wirtschaftlich. Es sollte deshalb von Wirtschaft und Politik gefördert werden.
- PVC-Rohstoffrecycling ist ohne Änderung der heutigen Wirtschaftsstrukturen nicht machbar. Nur die Verteuerung von Energie und Rohstoffen bei gleichzeitiger Entlastung des Faktors Arbeit können diesen Weg mittelfristig öffnen. Die damit verbundene relative Verteuerung gegenüber anderen Kunststoffen wie z. B. PE verschlechtert dann die Marktsituation von PVC.

## 12. Offene Fragen im PVC-Stoffstrom

Für die PVC-Produktion, die werkstoffliche PVC-Verwertung und chemische PVC-Verwertung und -Entsorgung werden folgende Mengenangaben mitgeteilt:

### **Produktionszahlen**

- 1990 wurden in der BRD 1,6 Millionen Tonnen PVC hergestellt (*Halbekath, 1992*). 1992 wurden in der BRD 1,4 Millionen Tonnen PVC verarbeitet, Marktzahlen nach produzierten Mengen liegen nicht vor (*Engelmann, 1992*).
- 1993 wurden ca. 1,4 Millionen Tonnen PVC produziert. Im Inland verblieben davon ca. 900 000 Tonnen (*Schadhauser, 1994 b*).

### **Derzeitige Verwertungsmengen**

- Nach Untersuchungen des VKE werden insgesamt etwa 500 000 Tonnen Kunststoffe rezykliert, zum größten Teil Verarbeitungsabfälle. Dementsprechend scheint ein Wert von 100 000 – 120 000 Tonnen für PVC wahrscheinlich. Gesicherte Zahlen liegen nicht vor (*Engelmann, 1992*).
- Die von der AgPU vorläufig errechneten Recyclingmengen betragen 1993 ca. 97 000 t, wobei in diesen Mengen auch verwertete Gewerbeabfälle enthalten sind, Produktionsabfälle sind nicht enthalten (*Eckstein, 1993*).
- Eigene Untersuchungen ergeben derzeit mögliche Recyclingmengen in der BRD zwischen 30 000 und 40 000 Tonnen pro Jahr, überwiegend handelt es sich dabei bisher noch um Produktions- und Verarbeitungsabfälle, also um Recyclingware aus Neuprodukten (dieser Bericht).
- Noch niedriger schätzt das IföR-Institut in Berlin die jährlich verwerteten Produktabfälle zu 15 000 – 20 000 Tonnen (*Halbekath, 1992*).

### **Materialrecycling-Potential**

- Der Anteil des rezyklierten Materials in Neuprodukten wird sich künftig – je nach Anwendung – zwischen 20 und 30 % bewegen (*Eckstein, 1993*). Solche Quoten werden erst im Laufe der Zeit (10 – 30 Jahren) erreicht.
- Eigene Abschätzungen auf der Basis bisheriger Recyclingaktivitäten bei Fenstern, Rohren, Bodenbelägen und Folien ergeben künftige Potentiale für PVC-Rezyklate von rund 140 000 t pro Jahr (dieser Bericht).

### **Zukünftige Entwicklung**

- Die von der AgPU für die nächsten Jahre vorläufig errechneten Abfallmengen aus PVC-Anwendungen betragen im Zeitraum von 1995 bis 2010 im Mittel rund 400 000 Tonnen pro Jahr (*Eckstein, 1993*).
- Mittelfristig ist mit einer PVC-Abfallmenge von bis zu einer Million Tonnen jährlich zu rechnen (*Halbekath, 1992*).
- Das Gesamtabfallaufkommen wird gegenwärtig auf 200 000 Tonnen pro Jahr geschätzt. Bereits mittelfristig ist mit einem verstärkten Anfall von PVC-Abfällen zu rechnen. Es scheint realistisch, zukünftig von einem PVC-Anfall zwischen 750 000 t und 1 Million Tonnen pro Jahr auszugehen. Dabei ist offen – von Sektor zu Sektor unterschiedlich –, wie und in welchem Umfang die Abfälle tatsächlich für die Verwertung verfügbar gemacht werden können.

### ***Rohstoffrecycling***

- Für die chemische Behandlung von nicht werkstofflich verwertbaren PVC-Abfällen ist mittelfristig eine Kapazität von 250 000 t/a vorgesehen (*Eckstein, 1993*).

Die Angaben verschiedener Autoren zu den derzeitigen Verwertungsmengen, zur zukünftigen Abfallentwicklung und zum Recyclingpotential weichen stark voneinander ab. Offensichtlich ist die Quellenlage schlecht, so daß der Schätzungsspielraum groß ist. Dies ist unbefriedigend.

Vorstehende Mengenangaben kann man wie folgt interpretieren:

#### ***Heutige Situation (1993)***

Die verarbeitete Menge von Frisch-PVC im Inland beträgt rund 0,9 Mt. Derzeitige Rezyklatmengen aus Altprodukten von rund 0,02 Mt sind noch relativ klein, sie sollen hier nicht berücksichtigt werden. Die PVC-Abfälle betragen rund 0,2 Mt, möglicherweise werden davon rund 0,1 Mt verbrannt. Die 1993 insgesamt in Umlauf gebrachte PVC-Menge (neu und alt einschließlich Export) beträgt 1,4 Mt. Zusätzlich der bereits im Inland in Umlauf befindlichen angenommenen Menge von ca. 17 Mt wäre damit Ende 1993 eine Menge von ca. 18,5 Mt im Umlauf.

#### ***Mittelfristige Situation (2000 – 2010)***

Es wird angenommen, daß in 10 Jahren (2003) bei unveränderter Nachfrage die jährlich frisch erzeugte PVC-Menge von 1,4 Mt gleich der Abfallmenge an Altprodukten ist. Durch Materialrecycling können dann möglicherweise 0,3 Mt/a (ein Drittel des Inlandverbrauchs) in neue PVC-Produkte eingearbeitet werden. Die jährlich zu erzeugende Frischproduktion könnte damit auf 1,1 Mt abgesenkt werden und ebenso auch die Abfallmenge.

Legt man für eine chemische Verwertung zu diesem Zeitpunkt ca. 0,4 Mt/a zugrunde (vergl. AgPU-Berechnungen), so verbleibt ein Überhang von 0,7 Mt/a.

**Mit dieser Zahlenbetrachtung für zwei Momentaufnahmen (1993 und 2003) wird deutlich, daß plausible Kreislaufkonzepte der PVC-Produktlinien noch geschaffen werden müssen, insbesondere langfristige Konzepte, welches z. B. die nächsten 30 – 50 Jahre in den Blick nehmen.**

### 13. Handlungsmöglichkeiten

PVC konnte durch seine vielseitig einstellbaren Eigenschaften, seine Langlebigkeit und Pflegearmut einen riesigen Markt erobern. Hierfür sind vor allem ökonomische Gründe aus betriebswirtschaftlicher Sicht maßgebend gewesen, die zu dem günstigen Preis von PVC führten, der heute unter Entsorgungsgesichtspunkten zu relativieren ist. Umweltrelevante Probleme, wie die Gesundheitsschädigung mit Todesfolge durch das krebserzeugende Vorprodukt Vinylchlorid bei Arbeitern bis in die 70er Jahre und die Dioxinproblematik bei der Müllverbrennung konnten nach derzeitigem Kenntnisstand in der BRD und vergleichbaren Ländern weitgehend entschärft werden bzw. werden in absehbarer Zeit weitgehend entschärft sein.

Derzeit wird die Frage des Recyclings diskutiert und im Zusammenhang damit ein neues Kreislaufkonzept. Bereits 1988 wurde mit der "Initiative Global-Recycling am Beispiel des PVC" ein Kreislaufkonzept vorgestellt. Darin hieß es: "Der geschlossene Salzkreislauf ist machbar". Die AgPU stellte sich vor, daß der bei der Abfallverbrennung (gemeint war die kommunale Müllverbrennung) entstehende Chlorwasserstoff durch Zusatz von Natronlauge wieder in Kochsalz verwandelt und erneut in den Chloralkali-Elektrolysen eingesetzt werden könnte. Dieses Konzept des geschlossenen Salzkreislaufes erwies sich für die Praxis als nicht geeignet (NaOH-Einsatz, erneute kostenaufwendige Elektrolyse, Salzverunreinigungen).

Ein neues in die öffentliche Diskussion gebrachtes Kreislaufkonzept PVC sieht die Rückgewinnung des bei der Verbrennung von nicht rezyklierbaren PVC-Altprodukten entstehenden *Chlorwasserstoffes für die Neuproduktion von PVC vor*. Eine entsprechende Technologie muß erst noch entwickelt werden, so daß eine Beurteilung dieses Konzeptes heute noch nicht möglich ist.

Welche Handlungsalternativen sind möglich? Wie können die drei Herstellungspfade für Granulat miteinander verknüpft werden?

#### A) Rohstoffrecycling: *HCl-Rückgewinnung*

Für die Rücklaufmengen von PVC-Abfällen nimmt man an, daß mittelfristig rund ein Drittel dem werkstofflichen Recycling bzw. den MVA's zugeführt werden, und daß zwei Drittel anders entsorgt werden müssen. Die chemische Industrie untersucht derzeit die Möglichkeit der HCl-Rückgewinnung durch Verbrennung der

PVC-Abfälle in einer großen zentralen HCl-Recycling-Anlage. Als noch zu klärende Fragen wurden identifiziert (*Hornig, 1994*):

- PVC-Abfallverfügbarkeit
- Finanzierung
- Partnerbeteiligung.

Entscheidend ist die Lösung des Finanzierungsproblems. Mit der Verarbeitung von einer Tonne Abfall-PVC in einer HCl-Recycling-Anlage würden höhere Kosten entstehen, als für die Produktion einer Tonne Frisch-PVC über den Elektrolyseweg.

Da niemand nachträglich Entsorgungskosten in Höhe der Herstellungskosten freiwillig bezahlen wird, muß in Zukunft der Herstellungspreis um die Entsorgungskosten erhöht werden. Für alle PVC-Produkte, die nach Gebrauch in einer HCl-Recycling-Anlage verbrannt werden müssen, würde dies bedeuten, daß sich ihr Verkaufspreis fast verdoppeln müßte.

Bei Importprodukten aus PVC müßte eine Abgabe in Höhe der künftigen Entsorgungskosten erhoben werden.

### **B) Materialrecycling: PVC-Rückgewinnung**

Die gezielte Einsparung von Rohstoffen und Energie wird durch hohe Quoten für das sortenreine Materialrecycling und hohe Zyklenzahl erreicht. Die Produktpalette müßte sich zu langlebigen Produkten hin verändern, die nach Gebrauch kostengünstig zum Ort ihrer Herstellung zurückgeführt und erneut verarbeitet werden können. Die Kosten für Rückführung und Aufbereitung liegen zum Teil bereits unter den Kosten für Frisch-PVC. Damit ist der ökonomische Anreiz für die PVC-Rückgewinnung gegeben bzw. absehbar. Wenn die Qualität des Rezyklats nach  $n$  Umläufen nicht mehr den Anforderungen genügt, könnte das Abfall-Rezyklat thermisch behandelt werden, bevor die Abfälle endgültig auf die Deponie gelangen. Die entstehenden Entsorgungskosten sind bereits beim Neukauf im Preis berücksichtigt worden (siehe A.).

### **C) Frischproduktion**

Die Verkaufspreise für die Frischproduktion auf dem Elektroysepfad müssen über die Verkaufspreise aus dem HCl-Recyclingpfad angehoben werden. Dies könnte z. B. über die zur Zeit diskutierte Energiesteuer bzw. Importabgaben erfolgen.

## 14. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die seit vielen Jahren andauernde kritische Diskussion der Chlorchemie richtet sich besonders auch auf die PVC-Produktion und ihre Folgen. Im Zusammenhang mit den immer weiter wachsenden Stoffströmen und zunehmenden Abfallproblemen ist das Recyclingproblem von PVC ein wichtiger Ansatzpunkt der Kritik geworden.

Dieser Bericht behandelt das PVC-Recycling, insbesondere folgende Punkte:

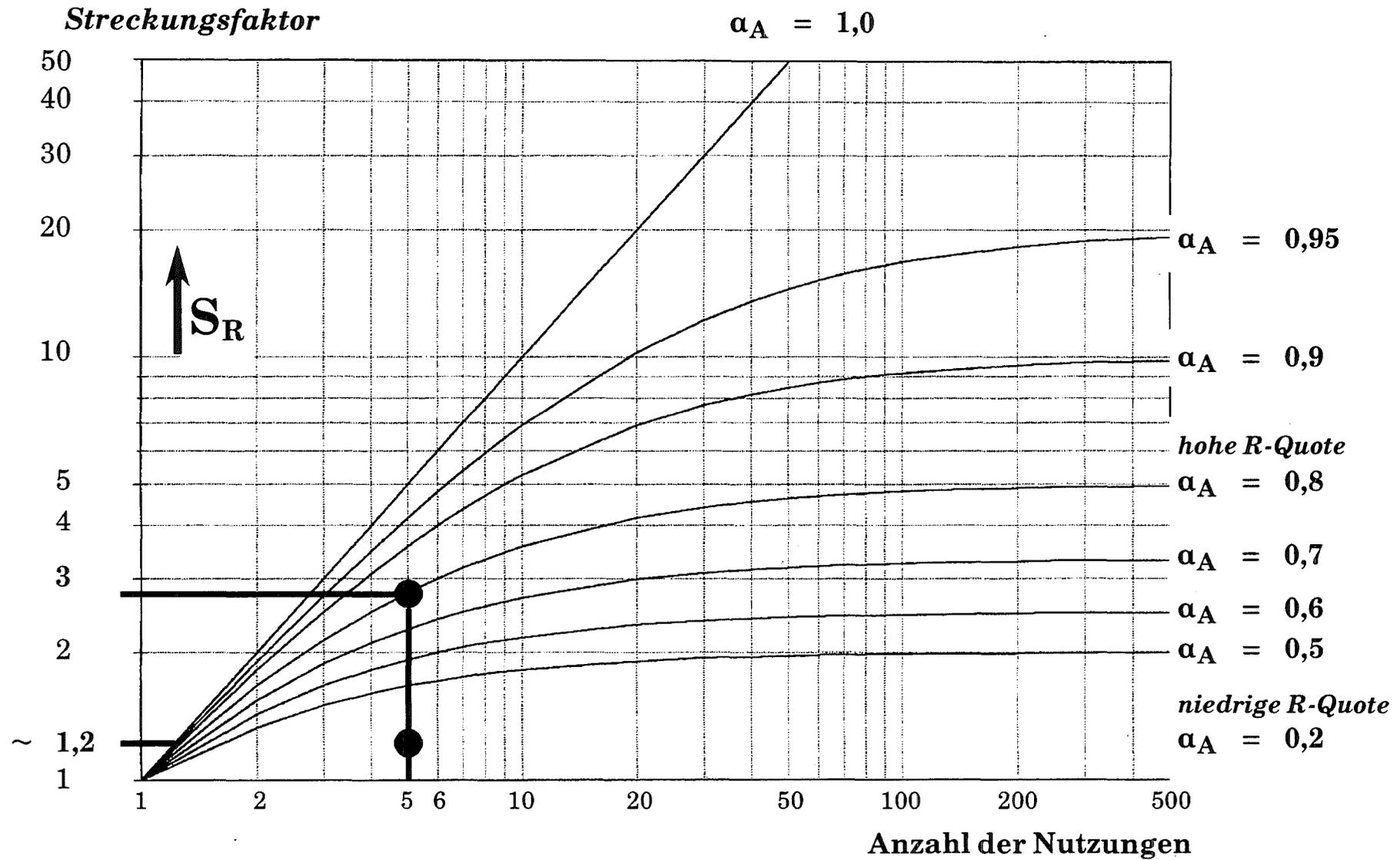
- Bedeutung des Recycling, Begriffe und Definitionen
- Formeln für Energieäquivalenzwerte mit Recycling
- Möglichkeiten und Grenzen des PVC-Recycling
- Stand des PVC-Recycling, Literatur und Praxis
- Recyclingpotential von PVC
- PVC-Kosten in verschiedenen Recycling-Pfaden
- Alternative Programme und Handlungsmöglichkeiten.

Wesentliche Aussagen und Ergebnisse:

- Die bisher vorwiegend praktizierte Durchflußwirtschaft muß Schritt für Schritt in Richtung auf eine **Kreislaufwirtschaft** entwickelt werden. Ihre kennzeichnenden Kriterien sind die Einsparung von Rohstoffen und Energie und die daraus resultierende geringere Umweltbelastung. Dieses Ziel wird u. a. durch das Recycling von Stoffen und Produkten erreicht.
- Mit **Recycling** bezeichnet man die erneute Verwendung von Produkten oder Teilen von Produkten. Demzufolge unterscheidet man das Produktrecycling (die Produktgestalt bleibt erhalten), das Materialrecycling (in polymererhaltenden Verfahren wird das PVC-Material aus Produktionsabfall oder aus gebrauchten Altprodukten für einen neuen Produktionsprozeß aufgearbeitet) und das Chemische Recycling (in polymeraufspaltenden Verfahren werden die gebrauchten PVC-Altprodukte in ihre Grundbestandteile zerlegt).
- Das **Produktrecycling** z. B. im Sinne von Mehrwegsystemen ist die Recyclingform von erster Priorität, der Stoff- und Energieeinsatz für ein neues Gebrauchsstadium ist vernachlässigbar klein. Die Wieder- und Weiterverwendung von PVC-Produkten kommt jedoch praktisch bisher kaum vor.
- Das **Materialrecycling** im Produktions- und Verarbeitungsprozeß ist übliche Praxis. Es handelt sich ausschließlich um die Rückführung sortenreiner PVC-Abfälle in den Produktionsprozeß innerhalb einer Produktlinie, weil das PVC als spezifisch zubereitetes Vielstoffgemisch nicht verändert werden darf. Nur so können die neuen Produkte mit Rezyklatanteilen Funktion und Qualität der frischen Produkte erreichen. Die Wiederverwendung sortenreiner **Produktionsabfälle** ist rohstoff- und energiesparend sowie zum Teil bereits

wirtschaftlich. Die hauptsächlich aus Produktionsabfällen bestehenden Recyclingmengen in der BRD liegen in einer Größenordnung von 50 000 Tonnen pro Jahr, das sind rund 6 % der PVC-Neuproduktion für das Inland von 0,9 Mt. Bei Ausschöpfung noch nicht genutzter Reserven dürfte der Recyclinganteil aus Neuware (Produktion und Verarbeitung) im Bereich von 9 % der Inlands-Neuproduktion liegen.

- Von wirtschaftlicher Bedeutung ist aber die Frage, in welchem Umfang die in den Markt gebrachten PVC-Produkte nach ihrem Gebrauch als **Altprodukte** wieder durch das **sortenreine Materialrecycling** in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden können. Bei einigen langlebigen PVC-Produkten konnte mit Demonstrationsanlagen in Testversuchen gezeigt werden, daß auch aufbereitete sortenreine Altprodukte ähnlich wie sortenreine Produktionsabfälle für die gleiche Anwendung mit den gleichen und modifizierten Produktionsanlagen wiederverwertet werden können (PVC-Rohre, PVC-Bodenbeläge, PVC-Fenster). Diese Entwicklungen stehen noch am Anfang und deshalb sind die bisher verarbeiteten Recyclingmengen noch sehr klein. Bisher gesammelte Erfahrungen, Abschätzungen der Recyclingpotentiale und bestehende Recyclingprogramme für geeignete PVC-Produkte deuten darauf hin, daß innerhalb der nächsten 10 Jahre rund 15 % der PVC-Neuproduktion im Inland (später möglicherweise auch einmal ein Drittel) als Rezyklatmaterial in neue Produkte einfließen kann. Der Energieaufwand für den Rezyklatanteil entspricht rund 15 % desjenigen für die Neuproduktion.
- Das Materialrecycling von **vermischten PVC-Produkten** sowie von vermischten Kunststoffen mit PVC-Anteilen ist unwirtschaftlich und führt zu subventionierten Produkten, für die es nur einen sehr begrenzten Markt gibt.
- Den weitaus größten Teil der PVC-Produktion (ca. zwei Drittel) am Ende der Produktlinien kann man mittelfristig aus heutiger Sicht nur mit polymeraufspaltenden Verfahren behandeln. Derzeit wird vor allem die Verbrennung der nicht werkstofflich rezyklierbaren PVC-Altprodukte diskutiert. Der dabei entstehende Chlorwasserstoff soll nach den Vorstellungen der Chemischen Industrie in den PVC-Produktionskreislauf zurückgeführt werden: **HCl-Recycling**. Die Chlorproduktion soll entsprechend zurückgefahren werden. Dieser Prozeß kann nur zentral in großen chemischen Fabriken realisiert werden. Er muß noch entwickelt werden, er ist zusammen mit der Logistik aufwendiger und teurer als der Materialrecyclingweg.
- **Ressourcenstreckung durch Materialrecycling (Bild A):**  
Die Zahl der Nutzungen (technische Grenzen) und reale Rücklaufquoten (Logistik) bestimmen hauptsächlich die Grenzen der Ressourcenstreckung. Für Massenkunststoffe ergibt sich bei voller Wiederverwendung und fünf Material-Nutzungen eine Ressourcenstreckung um den Faktor 1,2 (bei niedriger Recyclingquote) und um den Faktor ~ 3 (bei hoher Recyclingquote). Die Ressourcenstreckung unter Berücksichtigung der für die Herstellenergie erforderlichen Stoffmengen ist in Bild C als Energieeinsparung dargestellt.



**Bild A:** Ressourcenstreckung durch Materialrecycling  
(ohne Berücksichtigung der für die Herstellenenergieerzeugung benötigten Stoffmenge)

– **Recyclingvorgang für  $n$  Nutzungen des Materials** (Bild B):

Das Recyclingprodukt besteht in aller Regel aus Frischmaterial und Rezyklat. Das im Recyclingprozeß erzeugte Rezyklat muß bei jedem Umlauf (Nutzung) durch zusätzliches Frischmaterial ergänzt werden, um den nicht mehr verwertbaren Rezyklat-Abgang bei jedem Umlauf zu ersetzen. Bei Fensterprofilen können etwa gleich große Mengen Frischmaterial und Rezyklat verarbeitet werden.

– **Energieäquivalenzwerte und Energieeinsparung** (Bild C):

Für die Berechnung der Energieäquivalenzwerte mit und ohne Materialrecycling, mit und ohne Verbrennung sowie HCl-Recycling, Ressourcenstreckung, Deponiestreckung und CO<sub>2</sub>-Minderung wurden die notwendigen Gleichungen abgeleitet. Die Betrachtung von drei Szenarien (Materialrecycling mit 5 Nutzungen, Verbrennung und die Kombination von Recycling und Verbrennung) bei niedrigen und hohen Recyclingquoten zeigt den Weg zu nennenswerten Energieeinsparungen:

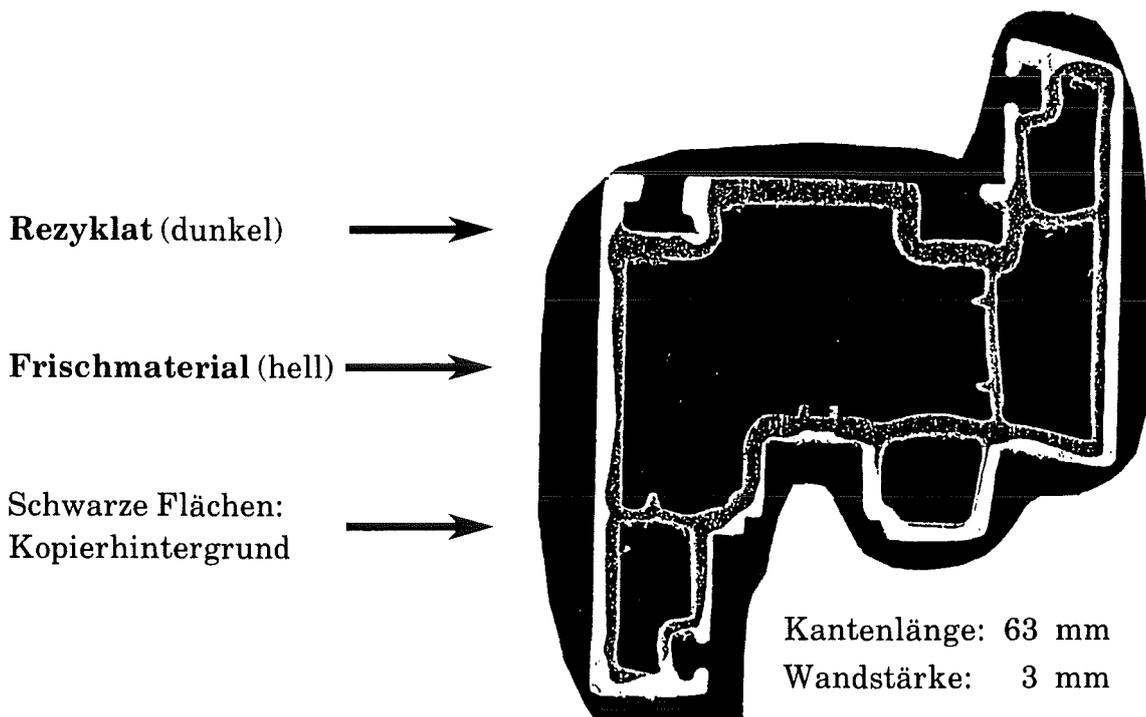
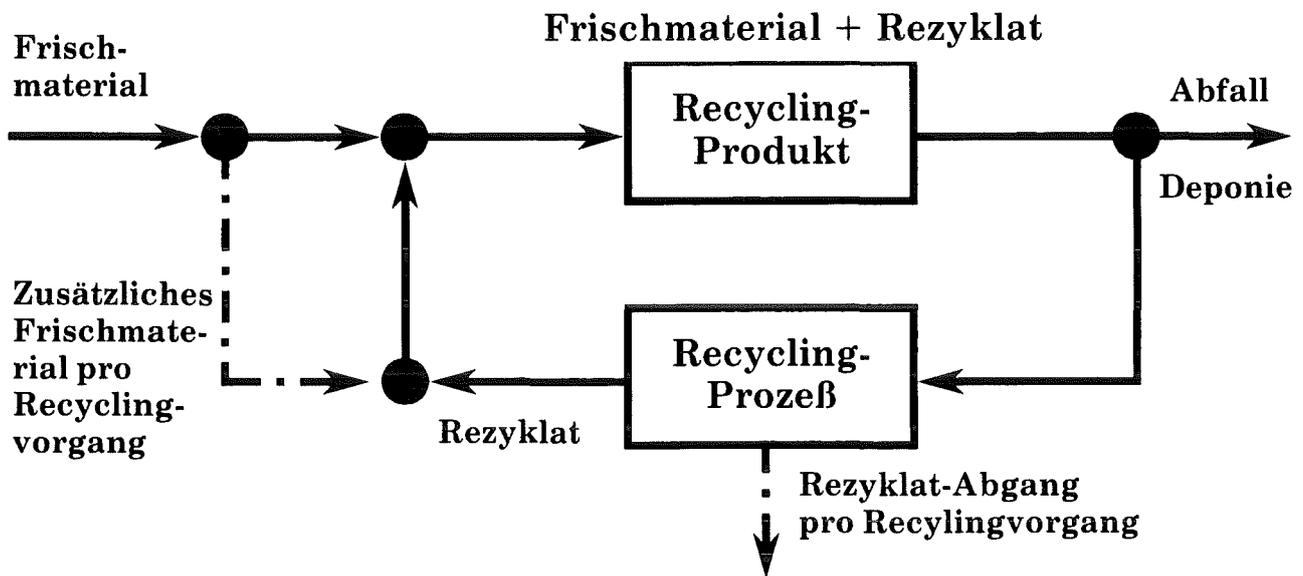
**Anzustreben sind hohe Recyclingquoten und das kostengünstige Materialrecycling ohne kostenaufwendige Verbrennung. Die möglichen Energieeinsparungen, bezogen auf den Fall der direkten Deponierung, liegen dann über 50 %, sowohl für PVC als auch für PE.**

Die Verbrennung allein führt bei niedrigen Recyclingquoten nur zu sehr geringen Energieeinsparungen, aber zu hohen Kosten. Verbrennung ist nur in Kombination mit Materialrecycling sinnvoll, wenn das Kostenproblem gelöst werden kann.

– **Mögliche Deponiestreckung** (Bild D):

Die Betrachtung der vorgenannten Szenarien zeigt, daß eine nennenswerte Deponiestreckung (~ Faktor 3) nur mit hohen Materialrecyclingquoten erreicht werden kann. Durch Kombination von Materialrecycling und Verbrennung ist bei PVC eine Deponiestreckung bis zu einem Faktor 6 möglich. Bei PE ergibt sich für niedrige und hohe Materialrecyclingquoten in Kombination mit Verbrennung ein Deponiestreckungsfaktor 10.

## Recyclingvorgang für n Nutzungen des Materials



### Beispiel: Fensterprofil - Querschnitt

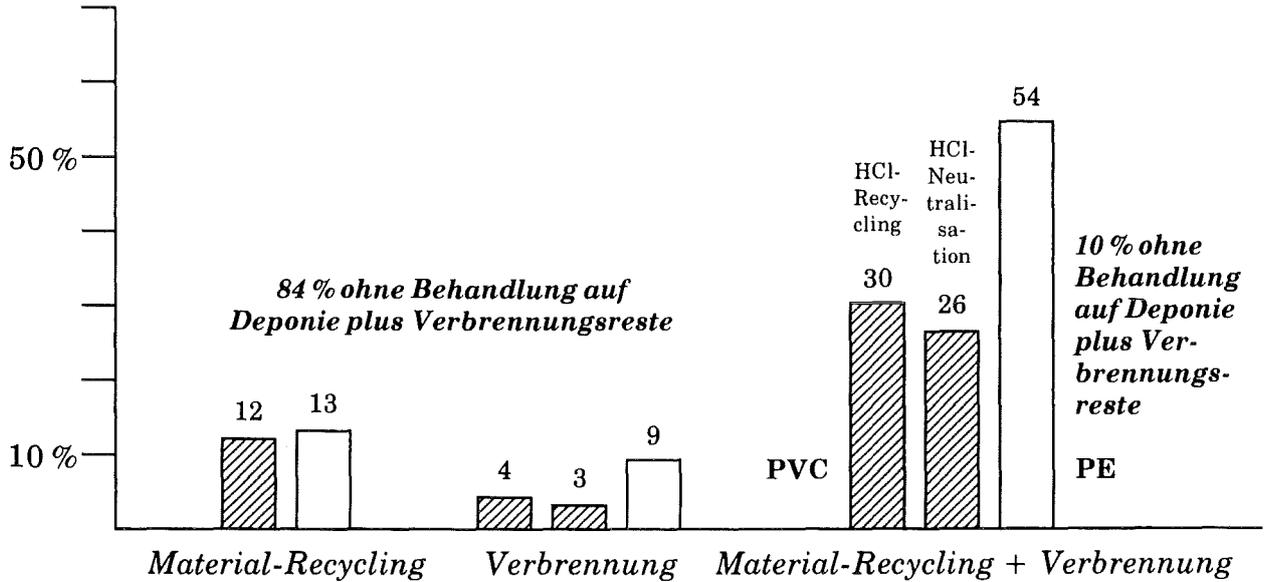
Bild B: Recyclingvorgang für n Nutzungen des Materials

# Mögliche Energieeinsparung

in Prozent bezogen auf den Fall der direkten Deponierung für drei Szenarien:

- Material-Recycling (5 Materialnutzungen)
- Verbrennung
- Material-Recycling und Verbrennung (M-R und V)

a) niedrige Material-Recyclingquote  $\alpha_{\text{eff}} = 0,16$  ( $\alpha_A = 0,2$ )



b) hohe Material-Recyclingquote  $\alpha_{\text{eff}} = 0,64$  ( $\alpha_A = 0,8$ )

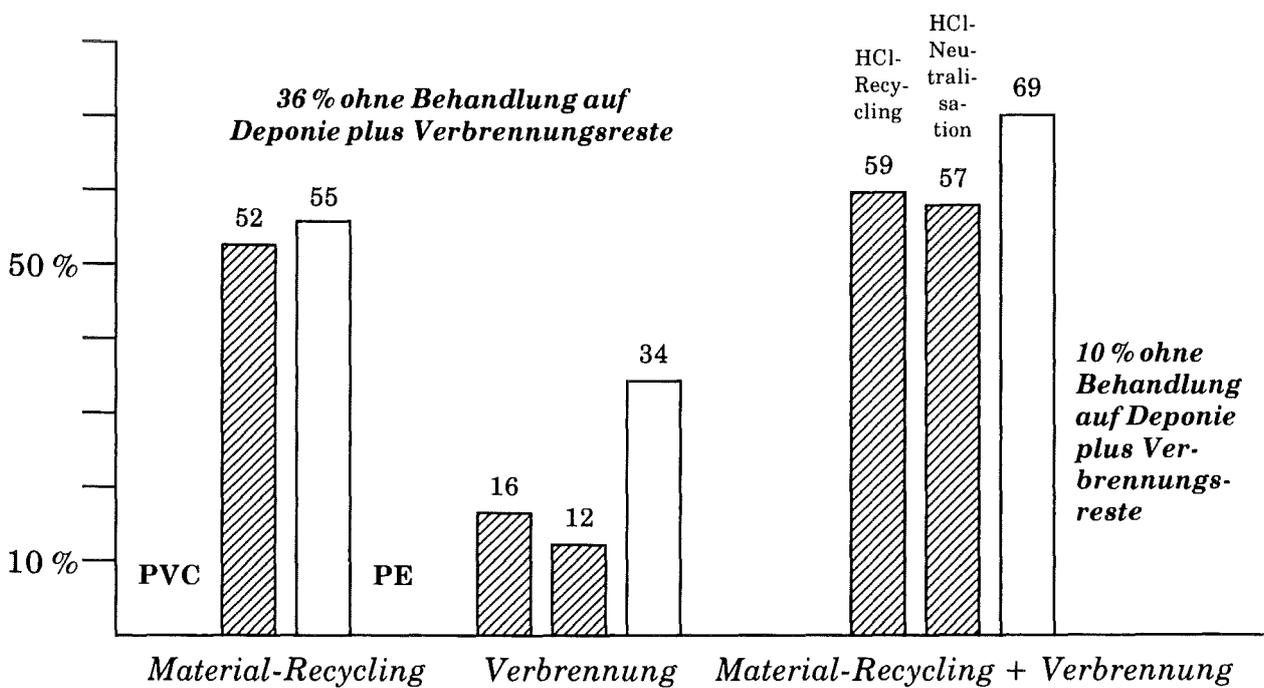


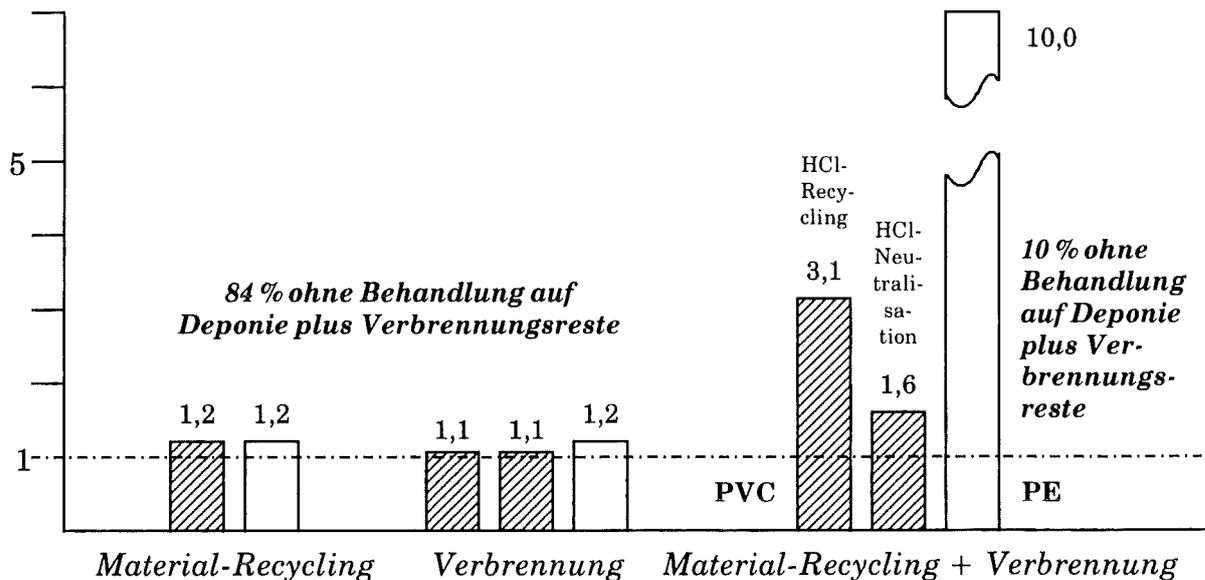
Bild C: Energieeinsparung bei verschiedenen Recyclingszenarien für PVC und PE

# Mögliche Deponiestreckung

Vielfaches der Kapazität bezogen auf den Fall der direkten Deponierung für drei Szenarien:

- Material-Recycling (5 Materialnutzungen)
- Verbrennung
- Material-Recycling und Verbrennung (M-R und V)

a) niedrige Material-Recyclingquote  $\alpha_{\text{eff}} = 0,16$  ( $\alpha_A = 0,2$ )



b) hohe Material-Recyclingquote  $\alpha_{\text{eff}} = 0,64$  ( $\alpha_A = 0,8$ )

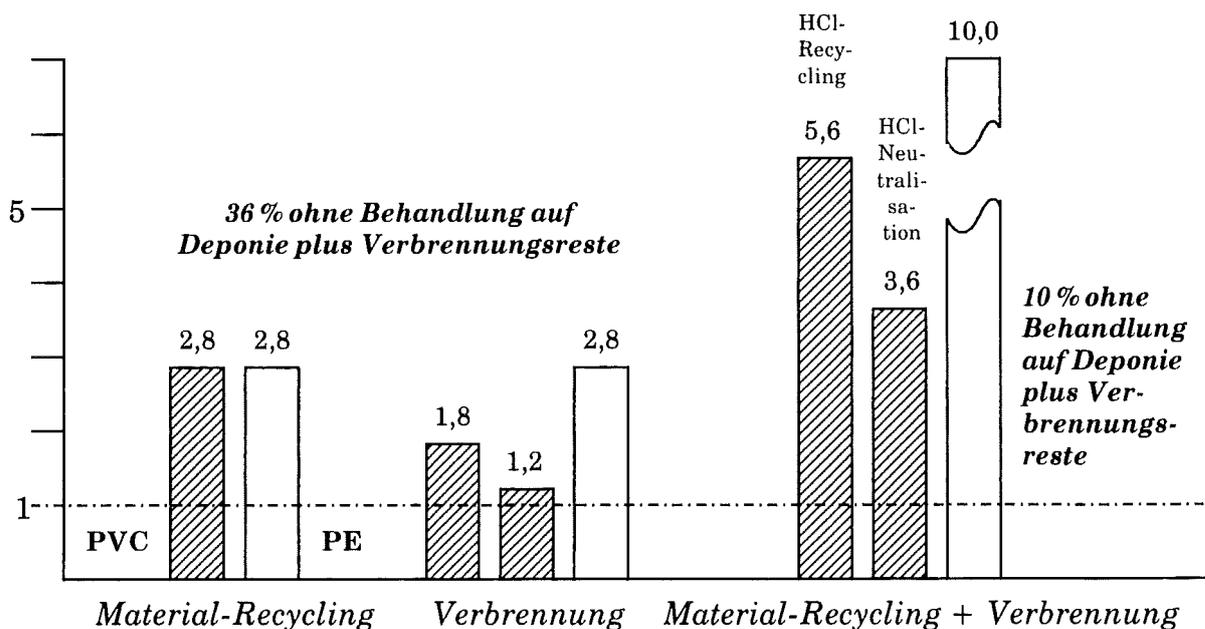


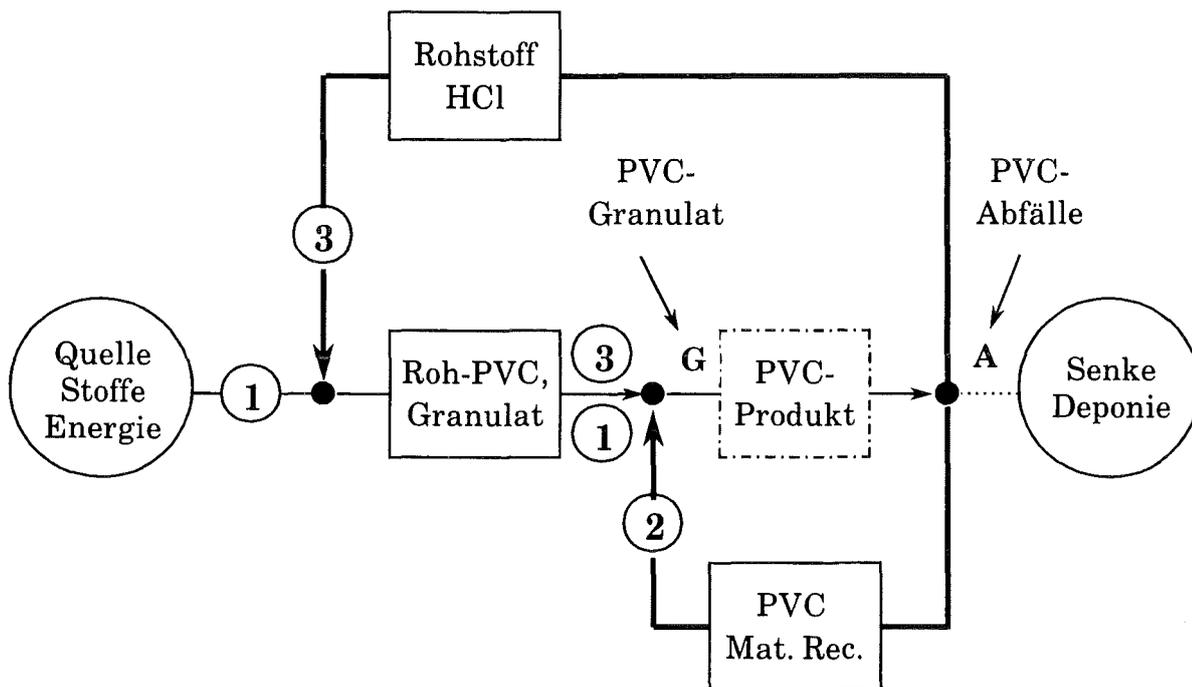
Bild D: Deponiestreckung bei verschiedenen Recyclingszenarien für PVC und PE

– **PVC-Mengen und Kosten** (Bild E und F):

Die beiden möglichen Recyclingkreise für PVC (Materialrecycling und HCl-Recycling) führen im Knotenpunkt G zu drei unterschiedlichen, spezifischen Granulatkosten.

Mittelfristig (~ 10 Jahre) könnte der Weg des Materialrecycling technisch und ökonomisch ohne Probleme beschriftet werden. Rund ein Drittel der Inlandproduktion (~ 300 000 t/a) könnte in Form sortenreiner Altprodukte mit den halben spezifischen Kosten der Frischproduktion in die Neuproduktion eingeschleust werden.

Zwei Drittel der Inlandproduktion (~ 600 000 t/a) können mittelfristig **nicht** auf dem Materialrecyclingweg, sondern **nur** auf dem Rohstoffrecyclingweg befördert werden. Bei Lösung der technischen Voraussetzungen kann der deutlich größere Anteil der PVC-Abfälle erst auf diesem Weg abfließen, wenn die Kostenfrage gelöst ist. Eine schrittweise Preisanhebung des auf dem Elektroyseweg gewonnenen PVC-Granulats auf das Niveau des auf dem HCl-Recyclingweg gewonnenen PVC-Granulats wäre notwendig, um den Rohstoffrecyclingkreis (PVC-Verbrennung) zu öffnen.



**Weg 1** = Granulat aus Primärrohstoffen

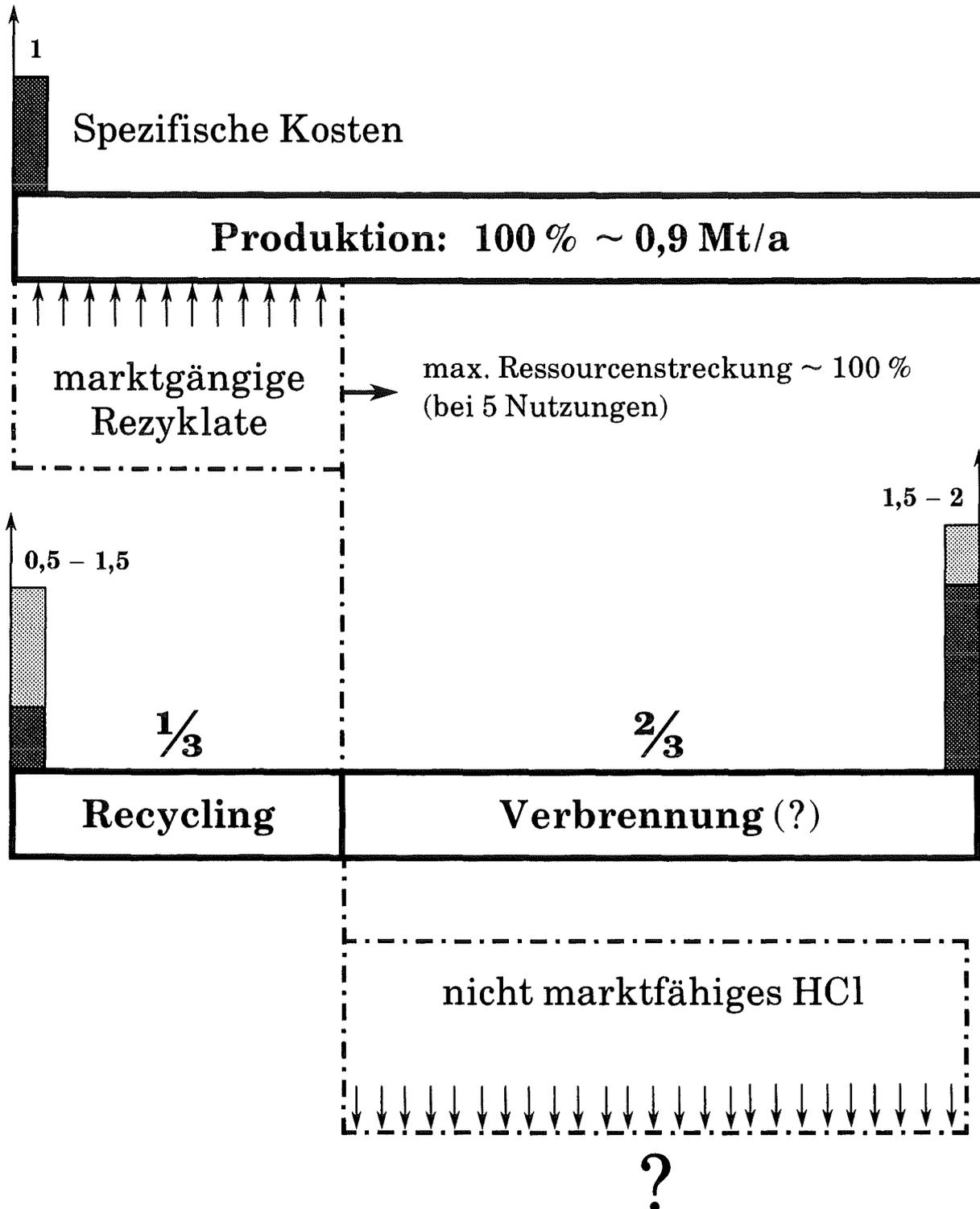
**Weg 2** = Granulat aus sortenreinen PVC-Abfällen

**Weg 3** = Granulat aus HCl-Rückgewinnung

**Bild E:** PVC-Recyclingkreise

# PVC-Mengen

(mittelfristige Entwicklung, 2005)



**Problem:** Für  $\frac{2}{3}$  der rücklaufenden PVC-Mengen ( $\sim 600\,000\text{ t/a}$ ) ist die Frage der Recycling-/Entsorgungskosten nicht gelöst

Bild F: PVC-Mengen (mittelfristige Entwicklung, 2005)

- Kurzgefaßt läßt sich zum PVC-Recycling feststellen:
  - Das Produktrecycling ist vernachlässigbar klein.
  - Das sortenreine Materialrecycling von PVC-Altprodukten ist für bestimmte Produktlinien technisch möglich, rohstoff- / energiesparend und wirtschaftlich. Der mengenmäßige Umfang könnte einmal 15 – 30 % der Neuproduktion (Inlandverbrauch) ausmachen.
  - Das Materialrecycling vermischter Kunststoffe mit PVC-Anteilen und von Verbundmaterialien mit PVC als eine Komponente ist unwirtschaftlich und mengenmäßig ohne Bedeutung.
  - Für den größten Teil der entstandenen und entstehenden PVC-Altprodukte (mehr als 70 %) ist der Entsorgungsweg bis auf weiteres offen.
  
- Als Handlungsmöglichkeiten sollten u. a. diskutiert werden:
  - Option A:** Der weitaus größte Teil der PVC-Produkte wird in zentralen Großanlagen verbrannt. Das sortenreine Materialrecycling wird branchenweise praktiziert. Die Problemlösung erfolgt durch die Chemische Industrie, z. B. im Rahmen der AgPU. Mit dieser Lösung ist nicht zwangsläufig eine Reduktion der Neuproduktion verbunden, Energie und Rohstoffeinsparung sind keine primären Ziele.
  
  - Option B:** Quoten für das Materialrecycling und stufenweise Preisanhebungen für Energie und Rohstoffe zur Verteuerung der Frischproduktion fördern dezentrale und branchenspezifische Kreislaufkonzepte. Dies ist ein Einsparungskonzept mit staatlichen Vorgaben. Energie- und Rohstoffeinsparung, verbunden mit einer entsprechenden Umweltentlastung, sind Primärziele.

## Quellen

**AgPU (1992):**

Recycling in der Praxis, Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt, Bonn, Mai 1992

**Becker; Braun (1985):**

Kunststoffhandbuch, 2. Polyvinylchlorid, Carl Hanser Verlag, 1985

**Berndt et al. (1991):**

Kosten für das Recycling von Kunststoff-Verkaufsverpackungen im dualen System, Technische Fachhochschule Berlin, Informationszentrum für Verpackung, Verpackungsoptimierung und Umwelt

**BMU (1992):**

Bundestagsdrucksache 12/2265

**Bredewold (1992):**

Firma WAVIN, Niederlande, persönliche Informationen

**Bühl, R (1992):**

PVC-Recycling. Möglichkeiten und Grenzen

in: PVC, ein Massenkunststoff und seine Umweltauswirkungen, Fortbildungszentrum Gesundheit und Umweltschutz (FGU), 21. Seminar UTECH, Berlin 1992, S. 101 – 113

**Deiringer (1993):**

Höchst AG, Werke Gendorf, persönliche Informationen

**Deutscher Bundestag (1992):**

Drucksache 12/2454 vom 21.04.1992

**DIW-Studie (1994):**

Wirtschaftliche Auswirkungen einer ökologischen Steuerreform, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Gutachten im Auftrag von Greenpeace e.V., Mai 1994

**DSD (1993):**

Neue Preisliste vom 22.03.1993, DSD, Bonn

**Eckstein (1993):**

Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt, Thema "Chlorchemie", Kommissionsdrucksache 12/11b, 29. Mai 1993. Stellungnahme der Sachverständigen für die öffentliche Anhörung am 3. und 4. Juni 1993

**Engelmann (1992):**

Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg

**Entsorga (1992):**

Entsorga-Magazin, 10/92, Entsorgungswirtschaft

**Franze (1993):**

Automobil-Umweltverträglichkeit in VDI-Tagung "Kumulierte Energie und Stoffbilanzen – ihre Bedeutung für Ökobilanzen", München 1993, VDI-Berichte 1993

**Friege, H.; Lahl, V.; Frank, C.; Genisch, K.O. (1992):**

PVC – ein zu Recht umstrittener Werkstoff, Nachr. Chem. Techn. Lab. 40/1992, Nr. 9

## Quellen

**Fritsche, U. et al. (1989):**

Umweltwirkungsanalysen von Energiesystemen: Gesamt-Emissionsmodell Integrierter Systeme (GEMIS), Darmstadt und Kassel, 1989

**Gächter; Müller (1990):**

Kunststoff Additive, 3. Ausgabe, Hanser Verlag, München

**GKV (1992):**

Kunststoffrecycling – Verwerterbetriebe von Kunststoffabfällen – Literaturrecherche, Ausgabe 1991/1992, Hanser-Verlag, 1992

**Habersatter, K. (1991):**

Ökobilanz von Packstoffen, Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schriftenreihe Umwelt 132, Bern 1991

**Härdtle et al. (1991):**

Recycling von Kunststoffabfällen, Müll und Abfall, Beiheft 27, 1991

**Halbekath, J.; Moser, M. (1992):**

Stand des PVC-Recyclings in Deutschland und seine umweltpolitische Bedeutung. Institut für ökologisches Recycling, Berlin, in: Greenpeace Studie Chlorchemie, Juni 1992

**KI 05.03.1992, S. 3:**

Zitiert in: Halbekath, J.; Moser, M., Greenpeace Studie Chlorchemie, 1992, S. 41,

**Euwid (1991), Nr. 24:**

Zitiert in: Halbekath, J.; Moser, M., Greenpeace Studie Chlorchemie, 1992, S. 44

**Herbold (1987)**

Feinmahlen von Kunststoffabfällen löst Qualitätsprobleme.  
Kunststoffe 77 (1987), S. 1141 - 1142

**Hofmann, V. (1992 a):**

Fußböden – Rücklauf in neue Produkte, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 1992, S. 181 – 189

**Hofmann, V. (1992 b):**

Hüls Troisdorf AG, persönliche Informationen

**Hornig (1994):**

Vortrag "Recycling von PVC" im Kernforschungszentrum Karlsruhe 01. Juli 1994: "HCl-Recycling durch Hochtemperaturverbrennung von PVC", Manuskript vom 28. Juni 1994

**Kindler, H.; Nikles, A. (1979):**

Energiebedarf bei der Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen,  
Chem.-Ing.-Tech. 51 (1979), S. 1125

**Kindler, H.; Nikles, A. (1980):**

Energieaufwand zur Herstellung von Werkstoffen - Berechnungsgrundsätze und Energieäquivalenzwerte von Kunststoffen, Kunststoffe 70 (1980), S. 802-807

**Leschonski, K. et al. (1991):**

Aufbereitung von Kunststoffabfällen zum Zwecke der Wiederverwertung (Zerkleinern, Klassieren). Forschungsprogramm "Wiederverwertung von Kunststoffabfällen", April 1991

**Lohrer, W.; Plehn, W. (1987):**

Umweltbelastung durch PVC, Staubreinhaltung der Luft 47, 1987

**Martl (1993):**

Höchst AG, Werk Gendorf, persönliche Informationen

**Mosthaf, H.; Nikles, A. (1990):**

Ökobilanz von Kunststoffverpackungen, Memo BASF (27.9.1989/gu; 17.12.1990/wi), 15 S.

**Neumann, H.-W. (1992):**

Hüls Troisdorf AG, persönliche Informationen

**Rauser, G. (1992):**

Verfahren zur hydrierenden Verflüssigung von Kunststoffabfällen, in: Recycling von Kunststoffabfällen, Menges / Michaeli / Bittner (Hrsg.), Carl Hauser Verlag, München Wien, 1992, S. 254 – 255

**Richter, K. (1992):**

Ökobilanzen von Bauprodukten am Beispiel "Fenster". Systemgrenzen und Schlußfolgerungen, in: PVC – ein Massenkunststoff und seine Umweltauswirkungen, UTECH-BERLIN, Umwelttechnologieforum 1992, S. 117 – 125

**Schadhauser, E. (1992):**

Wacker Chemie; Vortrag "Zusammenfassung über Recyclingaktivitäten und -entwicklungen", Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, Würzburg, 1992, S. 199 – 217

**Schadhauser, E. (1994 a):**

Vinnolit, Burghausen, persönliche Mitteilung

**Schadhauser, E. (1994 b):**

PVC-Baustoff: Ökologie, Recycling, Ökonomie, Deutsche Bauzeitschrift, DBZ 2 / 94, S. 107 – 110

**Schönborn, H.-H. (1989):**

Alt- und Neukunststoffe – Übersicht in: Stoffliche Verwertung von Abfall- und Reststoffen, VDI-Bildungswerk 1989, S. 57 – 75

**Stolzenberg, A. (1989):**

Bewährte Technik im neuen Produktdesign – Erfolgreiche Inbetriebnahme der AKW-Kunststoffaufbereitungsanlage Blumenrod, in: Thomé-Kozmienski, Recycling von Abfällen, 1. EF Verlag, Berlin 1989. S. 251 – 264

**Thalmann, W. (1992):**

Ökobilanzen für Kunststoffe in: Recycling von Kunststoffen (Menges / Michaeli / Bittner, Hrsg.), Hanser Verlag, S. 17 – 50

**Tötsch, W.; Gaensslen, H. (1990):**

Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1990

**Tötsch, W. (1992):**

Polyvinylchlorid – der umstrittene Werkstoff, Nachr. Chem. Techn. Lab. 40 (1992), Nr. 6

**Tötsch, W.; Pollack, H. (1992):**

PVC und Ökobilanz, UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. 4 (2), 1992

## *Quellen*

**Umweltmagazin (1991):**

Blumenkübel aus Scheckkarten, im Umweltmagazin 4/1991, S. 8

**VDI (1991):**

VDI-Richtlinien, VDI 2243 (Entwurf), Mai 1991

**VDI (1993):**

Chemisches Recycling für die Müllentsorgung – Hydrierung knackt Ketten, VDI-Nachrichten, Nr. 8, 26.2.1993

**Wacker-Chemie (1992):**

Umweltbericht 1991/1992 der Wacker-Chemie GmbH