

# **PVC – HEUTE**

## **Die aktuelle Situation des Werkstoffs Hart-PVC in den relevanten Themenbereichen**

September 2007

IM AUFTRAG DES  
FACHVERBANDES DER CHEMISCHEN INDUSTRIE  
ÖSTERREICHS (FCIO)

DURCHGEFÜHRT VON:  
ANDREAS WINDSPERGER,  
BRIGITTE WINDSPERGER UND RICHARD TUSCHL



**INSTITUT FÜR  
INDUSTRIELLE  
ÖKOLOGIE**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
1.1 Hintergrund	3
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Vorgangsweise	4
1.4 Themenfeldanalyse	5
1.4.1 Bewertungsmethodik	6
<b>2 Rohstoffbereitstellung – Chlorchemie international mit dem Schwerpunkt auf der EU</b>	<b>7</b>
2.1 Rohstoffverfügbarkeit	7
2.2 Chlorherstellung mit Chlor-Alkali-Elektrolyse	8
2.2.1 Amalgamverfahren	8
2.2.2 Diaphragmaverfahren	9
2.2.3 Membranverfahren	9
2.2.4 Technologische Entwicklung der Chlorherstellung mit Chlor-Alkali-Elektrolyse	10
2.3 PVC und die Vermeidung der Chlorchemie	13
2.4 Risiko der technischen Anlagen	15
2.5 Umweltbelastungen durch die Chlorchemie	16
2.6 Energiebedarf und Klimarelevanz	19
2.7 Wertschöpfung durch Koppelprodukte der Elektrolyse	23
2.8 Transportrisiko	23
2.9 PVC-spezifische Belastungen am Arbeitsplatz	25
2.10 Arbeitsunfälle in der Chlorchemie	25
<b>3 Vom Compound bis zum Endprodukt Schwerpunkt auf Verarbeitung in Österreich, Roh-PVC Import aus EU-Ländern</b>	<b>27</b>
3.1 Additive	28
3.2 Stabilisatoren	29
3.3 Farbpigmente	30
3.4 Energiebedarf der Verarbeitung	31
3.5 Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz	31
<b>4 Die Nutzung von PVC-Produkten Anwendungen in Österreich</b>	<b>32</b>
4.1 Wesentliche Anwendungsbereiche von PVC-Produkten in Österreich	32
4.2 Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Stabilisatoren	33
4.3 Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Farbpigmente	34
4.4 Kostenvorteil PVC	34
4.5 Technische Eignung der Produkte	34
4.6 PVC im Brandfall	35

4.6.1	Brandrisiko	35
4.6.2	Brandverhalten und Folgekosten im Brandfall	37
4.6.3	Personengefährdung im Brandfall	38
4.6.4	Bildung von persistenten toxischen Substanzen bei Bränden	39
<b>5</b>	<b>PVC-Produkte im und als Abfall Schwerpunkt zur Situation in Österreich</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Die aktuelle Abfallsituation bei PVC</b>	<b>41</b>
<b>5.2</b>	<b>Umweltbelastungen durch PVC im Abfall</b>	<b>42</b>
5.2.1	Umweltbelastungen durch Stabilisatoren und Farbpigmente	42
5.2.2	Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen	43
5.2.3	Mehrkosten in der Abfallverbrennung durch PVC	44
<b>5.3</b>	<b>Altmaterialeinsatz durch Recycling</b>	<b>45</b>
5.3.1	Situation bei PVC-Fenstern	47
5.3.2	Situation bei PVC-Rohren	47
5.3.3	Das Vinyloop Verfahren für PVC-Verbunde	48
5.3.4	Chemisches (rohstoffliches) Recycling	49
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>53</b>

# 1 Aufgabenstellung

Die vorliegende Studie wurde in Abstimmung mit der Interessensgemeinschaft PVC (API) vom Fachverband der Chemischen Industrie in Auftrag gegeben. Ziel ist die Darstellung der aktuellen Situation und der Entwicklungen in den für PVC relevanten Bereichen. Dabei soll der Schwerpunkt auf jenen Themenbereichen liegen, die von manchen Umwelt-NGOs und Beschaffern als kritisch gesehen werden und zu Bekenntnissen zur PVC-Vermeidung und zum Ausstieg aus der Anwendung von PVC geführt haben. Im Zuge der Arbeit soll festgestellt werden, wie weit die früheren Bedenken noch gerechtfertigt sind oder durch die Entwicklungen der letzten Jahre entkräftet werden konnten.

## 1.1 Hintergrund

Kunststoff spielt in unserem Leben mittlerweile eine bedeutende Rolle, ein Leben ohne Kunststoffe ist heute kaum mehr vorstellbar. PVC ist einer der wesentlichsten Kunststoffe, die derzeit im Einsatz sind. Polyvinylchlorid (PVC)<sup>1</sup> wird seit mehr als 50 Jahren großtechnisch hergestellt und gehört damit zu den ältesten synthetischen Polymeren. PVC-Produkte zeichnen sich durch Vielseitigkeit in der Anwendung und relativ niedrige Kosten aus. Der Ausgangsstoff für PVC, das Vinylchlorid, wird zum größten Teil aus Chlor und Ethylen hergestellt. Rohstoffe dafür sind Erdöl (43 %) und Steinsalz (57 %).

Rund 100.000 Tonnen PVC<sup>2</sup> werden jährlich in Österreich verarbeitet oder als Halb- oder Fertigprodukte importiert. Dabei haben rund 90 % Prozent der PVC-Produkte eine 10-jährige bzw. bis mehr als 50-jährige Lebensdauer. PVC verfügt unter allen Thermoplasten über das breiteste Anwendungsspektrum. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Additiven entwickelt wurde, die die Herstellung anwendungsspezifischer Compounds ermöglichen. Das Image speziell von PVC ist aber sehr kontroversiell. Dieser Kunststoff war als eines der ersten Chemieprodukte mit massiver Gegnerschaft von Umweltgruppen konfrontiert. Die Argumente in der Diskussion waren teilweise sachlich, aber auch von Polemik geprägt.

Auch auf europäischer Ebene hat sich die Politik ausführlich mit dem Werkstoff PVC befasst und im Juli 2000 ein Grünbuch zu PVC zur öffentlichen Diskussion erstellt. Mehrere tausend Stellungnahmen sind daraufhin bei der Europäischen Kommission eingegangen, wobei viele positive Äußerungen zum Werkstoff PVC, aber auch kritische Anmerkungen gemacht wurden<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> PVCplus Kommunikations GmbH; Initiative PVC plus - PVC Werkstoff;  
<http://www.pvcplus.de/index.php?id=50>

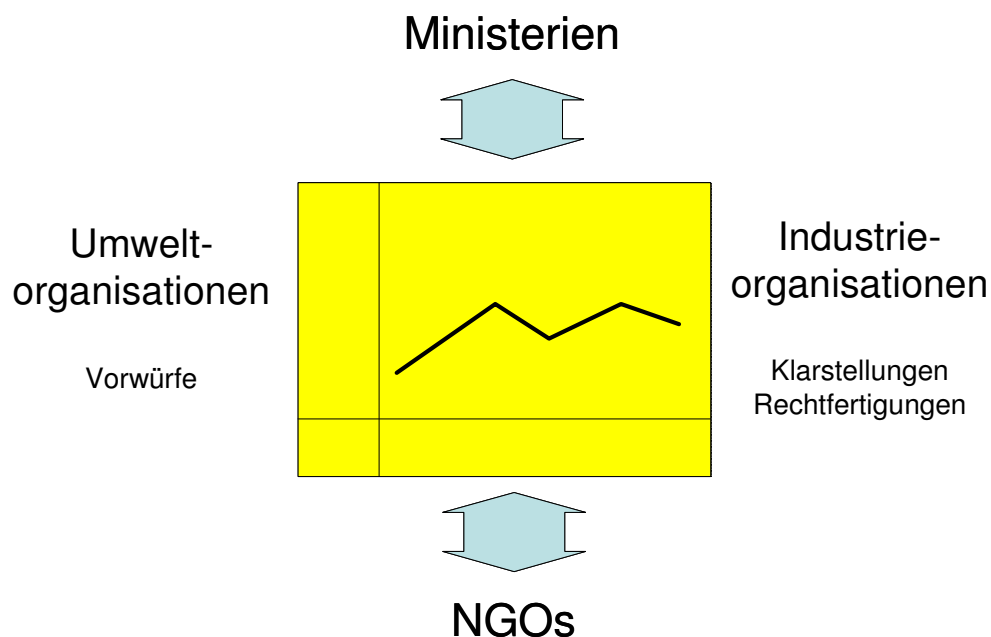
<sup>2</sup> API PVC- und Umweltberatung; Internetartikel; <http://www.pvc.at/d/api.htm>

<sup>3</sup> Europäische Kommission; Internetartikel; Polyvinyl Chloride (PVC); Feb. 2007  
<http://ec.europa.eu/environment/waste/pvc/index.htm>

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Studie strebt ein Update der Situation des Werkstoffs PVC in den einzelnen Phasen des Lebenszyklus an. Sie widmet sich dabei besonders den kritischen Punkten in der PVC-Diskussion und untersucht auf sachlicher Basis, in welchen Themenbereichen die geäußerten Bedenken durch die aktuelle Situation bereits entkräftet werden konnten bzw. wo sie noch berechtigt sind.

Der vorliegende Bericht soll einerseits als Basis für Gespräche mit Stakeholdern dienen, um eine Abstimmung der Sichtweisen zumindest in einzelnen Bereichen zu erreichen. Er soll aber auch zukünftige Perspektiven der PVC-Industrie aufzeigen und zur Klärung von weiterem Handlungsbedarf innerhalb der PVC-Industrie beitragen.



## 1.3 Vorgangsweise

Die Arbeit gliedert sich in die nachfolgenden drei Schritte:

- Zusammenstellung der kontrovers diskutierten Themenbereiche - Themenfeldidentifizierung
  - Erfassen der wesentlichen Argumentationslinien
  - Zusammenstellen der relevanten Themenbereiche nach Lebenszyklusphasen
- Recherchieren der aktuellen Situation und der laufenden Entwicklungen, sowie der dadurch bewirkten Veränderungen - Themenfeldanalyse
  - Veränderungen der Produktionstechnologie und ihre Auswirkungen
  - Entwicklungen bei Weichmachern und Stabilisatoren, Zusammensetzung und Einsatzmengen
  - Ergebnisse der ökologischen Bewertung von Produkten und die Position des Werkstoffs PVC
  - Veränderungen im Risikopotenzial der Produktionskette bis zur Nutzung
  - Erkenntnisse beim Brandverhalten und der entstehenden Personengefährdung

- Situation im Abfallmanagement
  - Recyclingmöglichkeiten
- Verbale Bewertung der Situation in den identifizierten Themenfeldern

Bei der Bewertung der Ergebnisse wird herausgearbeitet, ob und wie weit die Entwicklungen zu einer Verbesserung der derzeitigen Situation in den PVC-relevanten Themenbereichen geführt haben.

Die Ergebnisse der Themenfeldanalyse werden - nach zwei Richtungen strukturiert - dargestellt:

- Nach den Lebenszyklusphasen von der Rohstoffbereitstellung bis zum Granulat, Compound und Compoundverarbeitung, Nutzungsphase bis zur Entsorgung inklusive Recycling
- Innerhalb der Phasen nach Themenfeldern wie z. B. Ressourcenverfügbarkeit, Umweltbelastungen, Gesundheitsgefährdung, Risikopotenzial, Energiebedarf und Klimarelevanz, Kosten, etc.

Die Ergebnisse werden für Hart-PVC Produkte und Weich-PVC Produkte in getrennten Berichten dokumentiert. In den Themenfeldern, die den Grundstoff PVC betreffen, sind Inhalte und Aussagen gleich, die anwendungsspezifischen Kapitel unterscheiden sich entsprechend der verschiedenen Charakteristika von Hart- und Weich-PVC Produkten.

## **1.4 Themenfeldanalyse**

Im Rahmen der Themenfeldidentifizierung wurden die Kritikpunkte bzw. die Vorwürfe nach Themenfeldern (z.B. Ressourcenverfügbarkeit, Umweltbelastungen, Toxizität, Risikopotenzial, Energiebedarf und Klimarelevanz, Kosten, ...) zusammengestellt und diese dann den Lebenszyklusphasen (Produktionsprozess, Nutzung und Entsorgung bzw. Recycling) zugeordnet.

Im Rahmen der Themenfeldanalyse wird die aktuelle Situation an Hand von Literaturstellen beschrieben, kontroverse Sichtweisen werden einander gegenüber gestellt. Abschließend wird für jedes Themenfeld ein verbales Fazit versucht, das die Grundlage für den Bewertungsvorschlag nach der nachfolgend beschriebenen Methodik darstellt. Etwaiger Handlungsbedarf wird aufgezeigt bzw. werden - wenn möglich - Vorschläge zur Lösung gemacht, die abschließend in Kapitel 6 zusammengefasst und resümiert werden. Sie sollen als Grundlage für weitere Gespräche mit Stakeholdern dienen.

### 1.4.1 Bewertungsmethodik

Die Fazits (Schlussfolgerungen) in den einzelnen Themenfeldern werden mit einem Punkteschema in den nachfolgend angegebenen Stufen bewertet. Die Zuordnung zu einer Stufe ist ergänzend auch an der Hintergrundfarbe des Textfelds ersichtlich.

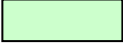




+		<i>Situation generell oder durch erfolgte Problemlösung vorteilhaft</i>
0		<i>Situation neutral oder nunmehr unbedenklich, bei größerer Tragweite eines Risikos nur minimale Wahrscheinlichkeit</i>
>		<i>Die Lösung kontroverser Situationen ist vorhanden, deutliche Verbesserungen sind bereits erfolgt</i>
-		<i>Nachteil von PVC, aber ohne ein derartiges Gefahrenpotenzial, das Marktbeschränkungen rechtfertigen würde</i>
!		<i>Es besteht Handlungsbedarf, um Gefahrenpotenzial zu mindern oder Anwendungsbeschränkungen abzuwenden</i>

Abbildung 1: Darstellung der Bewertungsstufen

## 2 Rohstoffbereitstellung – Chlorchemie international mit dem Schwerpunkt auf der EU

In dieser Lebenszyklusphase haben sich in den letzten Jahren massive Veränderungen ergeben, die durch den Umstieg von der Chlor-Alkali-Elektrolyse auf das Membranverfahren und arbeitsplatzrelevante Verbesserungen in der Prozesskette bis zum Granulat geprägt sind.

Die Betrachtung erfolgt hier international mit Schwerpunkt auf die EU, da hier der Großteil der Firmen, von denen in Österreich das Vorprodukt bezogen wird, ihren Sitz haben.

### 2.1 Rohstoffverfügbarkeit

PVC hat zwei wesentliche Rohstoffe: Chlor und Ethen (Ethylen). Der Grundstoff für Chlor ist Salz, das kann Stein- oder Meersalz sein. Salz ist als Rohstoff (zumindest auf die Menge für die Kunststoffherstellung bezogen) weltweit in unbegrenzter Menge vorhanden. Chlor ist eines der am weitesten verbreiteten Elemente der Natur, sowohl in den Weltmeeren als auch in unterirdischen Lagern in unerschöpflichen Mengen in Form von Salzen.

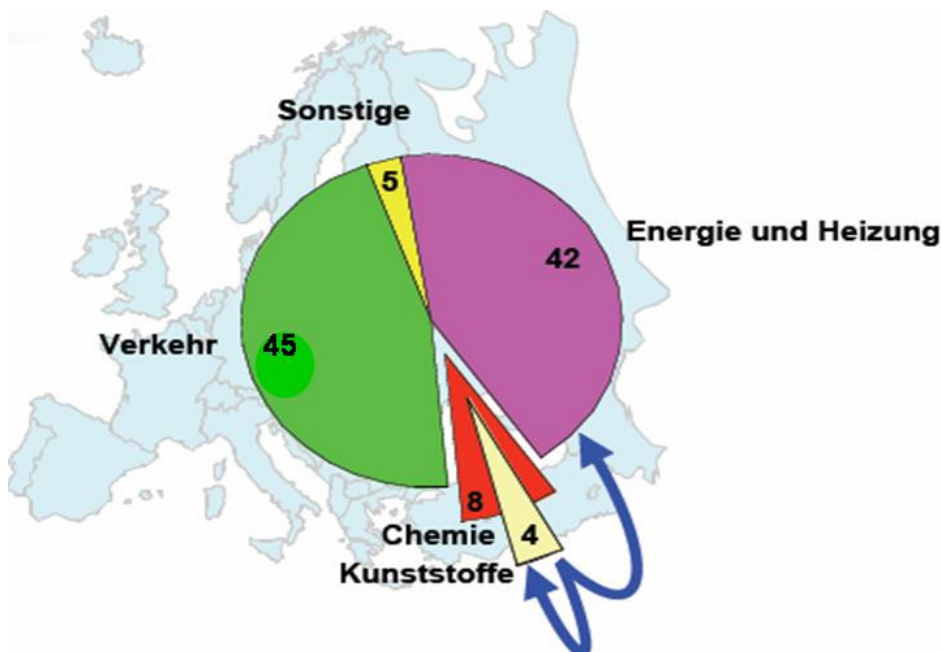


Abbildung 2: Einsatzgebiete von Erdöl<sup>4</sup>

Rohöl ist der Grundstoff für Ethen, der in der Raffinerie im Zuge der Rohöldestillation und der nachfolgenden petrochemischen Verarbeitung gewonnen wird. Der Großteil der Rohölprodukte geht als Treibstoff in den Verkehr bzw. wird als Energieträger in der Energie- oder Raumwärmebereitstellung eingesetzt. Diese Bereiche, bei denen Rohölprodukte verbrannt werden führen zur direkten Freisetzung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und sind damit für den Großteil des Treibhauseffekts verantwortlich,

<sup>4</sup> GUA GmbH; Kunststoffe und Energiebedarf; November 2005



sie machen 87 % des Erdölverbrauchs aus. Hingegen verbraucht die Kunststoffherstellung insgesamt nur etwa 4 % des Rohöls und bewirkt darüber hinaus keine direkte Freisetzung des Kohlenstoffs. Besonders die Langlebigkeit der meisten aus PVC hergestellten Produkte bewirkt eine Speicherung des fossilen Kohlenstoffs im Produkt (non-energy use of fossils). Gegenüber anderen Kunststoffen hat PVC den Vorteil, nur 43 % des Produktgewichts an Ethylen zu benötigen, was sich positiv auf den Verbrauch der fossilen Ressourcen auswirkt.

**Fazit: +**

Die PVC-Kunststoffmatrix basiert zu mehr als der Hälfte auf dem in beinahe unbegrenzter Menge vorhandenen mineralischen Rohstoff Salz und nur zu weniger als der Hälfte auf fossilen Ressourcen. Durch den geringeren Anteil des petrochemischen Grundstoffs Ethen (Ethylen) werden fossile Rohstoffe eingespart.

## **2.2 Chlorherstellung mit Chlor-Alkali-Elektrolyse**

Für die chemische Industrie ist das Element Chlor durch seine vielfältigen Eigenschaften ein Schlüsselprodukt, mit dem etwa 60 % des Umsatzes verbunden sind. Chlor wird durch Elektrolyse von Steinsalz hergestellt. Dabei wird die Eigenschaft genutzt, dass sich Natriumchlorid in wässriger Lösung mit Strom in die Elemente Chlor und Natrium auftrennen lässt, dieses Elektrolyse-Verfahren wird als Chloralkali-Elektrolyse bezeichnet<sup>5</sup>. Die Herstellung von 1 Tonne Chlor benötigt 1710 kg Natriumchlorid, es entstehen 2,26 Tonnen 50 %ige Natronlauge und 312 m<sup>3</sup> Wasserstoff (als Energiegutschrift). Die Elektrolyse erfordert aber den Einsatz von 2,4 bis 3,2 MWh elektrischer Energie<sup>6</sup>. Um Verunreinigungen aus dem Elektrolyten für die Elektrolyse zu entfernen, werden 54 kg Fällungsmittel (Natronlauge, Natrium- und Bariumkarbonat) eingesetzt. Die Verunreinigungen fallen als Abfall (151 kg, feucht) an<sup>7</sup>.

### **2.2.1 Amalgamverfahren**

Das Amalgamverfahren dient der Gewinnung von Chlorgas und Natronlauge, die wichtige Ausgangsprodukte nicht nur für die Kunststoffindustrie sind. Pro Jahr werden so etwa 55 Millionen Tonnen Chlor und 50 Millionen Tonnen Natronlauge hergestellt. Die Abscheidung von Chlor und Natrium an den Elektroden beruht auf der Verschiebung der Abscheidungspotenziale der Elemente Wasserstoff und Sauerstoff aufgrund von Überpotenzialen.

Die Elektrolyse von Natriumchlorid-Lösung erfolgt hierbei zwischen einer Graphit-Anode und der Namen gebenden Quecksilber-Kathode. An der Anode wird Chlorgas abgeschieden. Das an der Kathode gebildete Natrium bildet zusammen mit dem Quecksilber sofort Natriumamalgam. Das Amalgam wird danach mit Wasser behandelt, worauf sich Natriumhydroxid und Wasserstoff bilden. Das verbleibende Quecksilber wird in den Prozess rückgeführt.

<sup>5</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Chlor-Alkali-Elektrolyse>

<sup>6</sup> OR Ing. Heribert Ulrich; Positionspapier des BMWA; PVC im Baugewerbe; 1999

<sup>7</sup> Tötsch W., Gaensslen; Polyvinylchlorid, zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs; Köln 1990

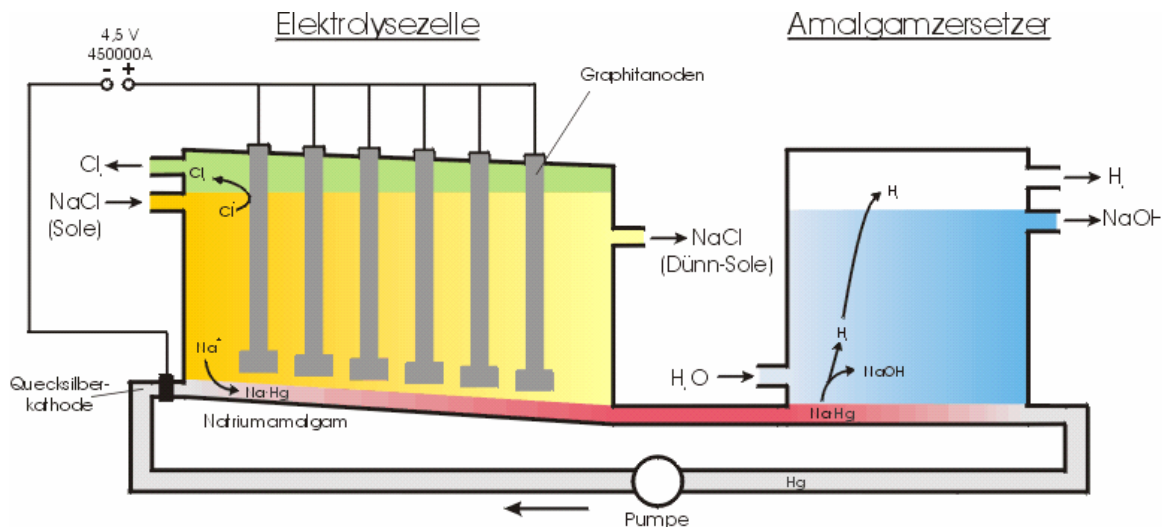


Abbildung 3: Schema Amalgamverfahren<sup>8</sup>

### 2.2.2 Diaphragmaverfahren

Beim Diaphragmaverfahren besteht die Kathode aus Eisen oder Stahl, die Anode aus Titan. Der Kathodenraum ist vom Anodenraum durch eine für Strom und Kationen durchlässige, poröse Trennwand abgegrenzt, damit das an der Anode gebildete Chlor weder mit dem an der Kathode gebildeten Wasserstoff, noch mit den ebenfalls gebildeten Hydroxidionen in Kontakt kommt. Man verhindert damit, dass Chlor mit den Hydroxidionen zu Chlorid- und Hypochlorit disproportioniert.

Früher bestand das Diaphragma aus Asbest, heute werden Diaphragmen auf Kunststoffbasis „Poliramix“ eingesetzt. Da dieses Diaphragma die in der Lösung vorhandenen Hydroxidionen nicht vollständig aus dem Anodenraum abtrennen kann, ist bei einer erhöhten Hydroxidionen-Konzentration eine Reaktion zu Wasser und Sauerstoff möglich, was die Gewinnung von Natronlauge bis zu einer Konzentration von etwa 12 bis 15 Prozent bedingt.

#### Vorteile:

- Niedrigerer Energieaufwand
- Geringste Umweltbelastung
- Hypochlorite (Bleichlauge) oder Chlorate können gebildet werden

#### Nachteile:

- Verunreinigte Natronlauge durch Natriumchlorid
- Diaphragma besteht bei alten Anlagen noch aus Asbest

### 2.2.3 Membranverfahren

Wie auch beim Diaphragmaverfahren arbeitet das Membranverfahren mit einer Titananode und einer Eisenkathode. Der entscheidende Unterschied besteht darin, dass das Diaphragma durch eine etwa 0,1 mm dünne chlorbeständige Kationenaustauscher-Membran ersetzt wurde, welche aus Polytetrafluethen (PTFE) mit negativ geladenen  $\text{SO}_3$  Resten besteht. Die entstehenden Anionen wie Hydroxid- oder Chloridionen können diese nicht passieren, wohingegen die positiv geladenen Natriumionen hindurch

<sup>8</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Chlor-Alkali-Elektrolyse>

gelangen. Aufgrund der Undurchlässigkeit für Chloridionen entsteht eine kaum verunreinigte 35 %ige Natronlauge.

#### Vorteile:

- umweltfreundlich und nicht gesundheitsschädlich, keine Verunreinigungen durch Asbest oder Quecksilber
- reine Endprodukte, nur Chlor mit geringen Spuren von Sauerstoff

#### Nachteile:

- Membranen sind empfindlich gegen Erdalkalimetallionen, welche sich an dieser festsetzen können und den Durchlass von Natriumionen behindern, daher aufwendige Reinigung der Sole nötig
- kostenintensiv wegen geringer Standfestigkeit und Lebensdauer

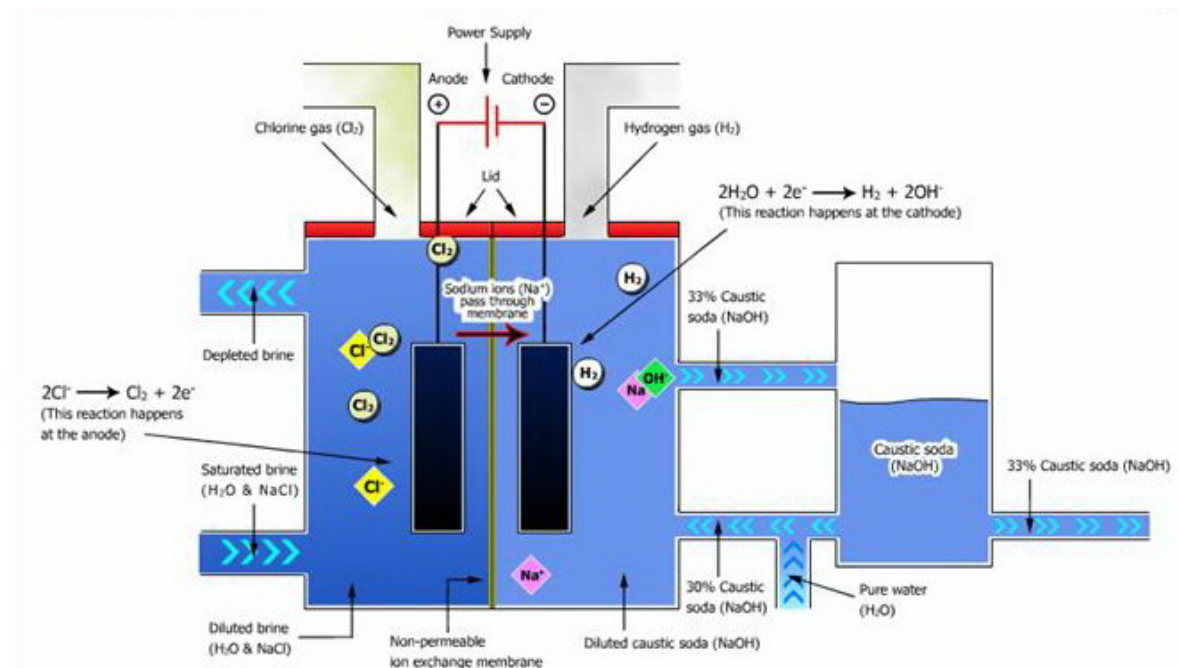


Abbildung 4: Schema Membranverfahren<sup>9</sup>

## 2.2.4 Technologische Entwicklung der Chlorherstellung mit Chlor-Alkali-Elektrolyse

Am Beginn der industriellen Herstellung stand das Amalgamverfahren, das auf Grund seiner Verwendung und der Emissionen von Quecksilber ein Angriffspunkt des gesamten Prozesses für Umweltgruppen war. Mittlerweile wird dieses Verfahren durch das umweltneutralere und energiesparendere Membranverfahren laufend ersetzt. Weltweit geht der Einsatz des Amalgamverfahrens zurück, die USA waren bereits vor dem Jahr 2000 mit dem Ausstieg schon sehr weit fortgeschritten.

<sup>9</sup> Eurochlor; <http://www.eurochlor.org/animations/diaphragm-cell.asp>

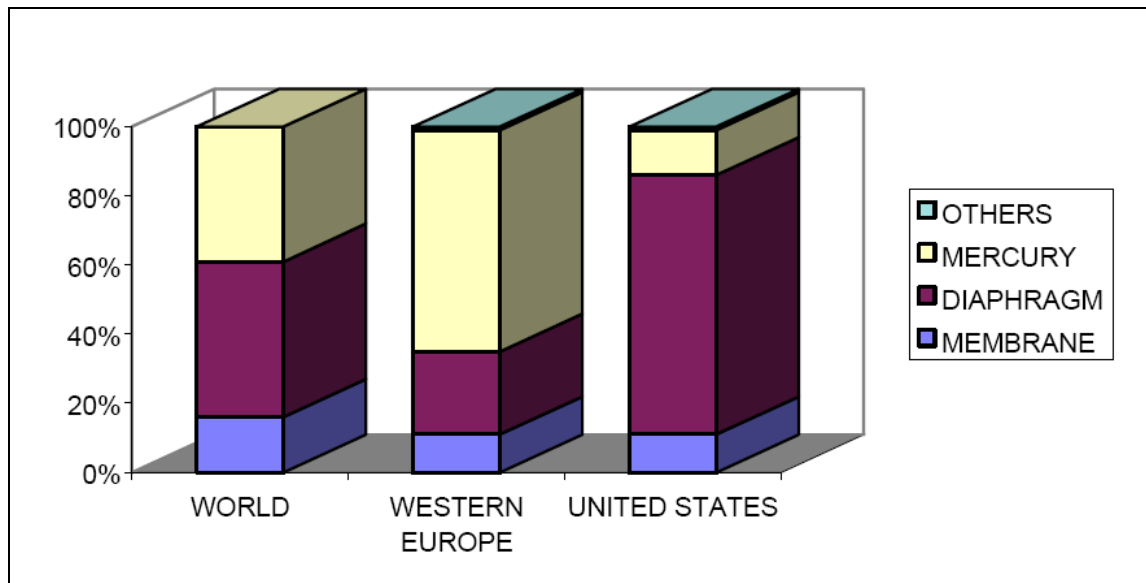


Abbildung 5: Elektrolyse-Verfahren weltweit<sup>10</sup>

Die Entwicklung der Anteile der Produktionsverfahren in Europa bis 2004 zeigt Abbildung 6. Man erkennt die deutliche Zunahme der quecksilberfreien Verfahren, die im Jahr 2004 etwa die Hälfte der Anlagen ausmachen. Neue Anlagen werden ausschließlich nach dem Membranverfahren gebaut.

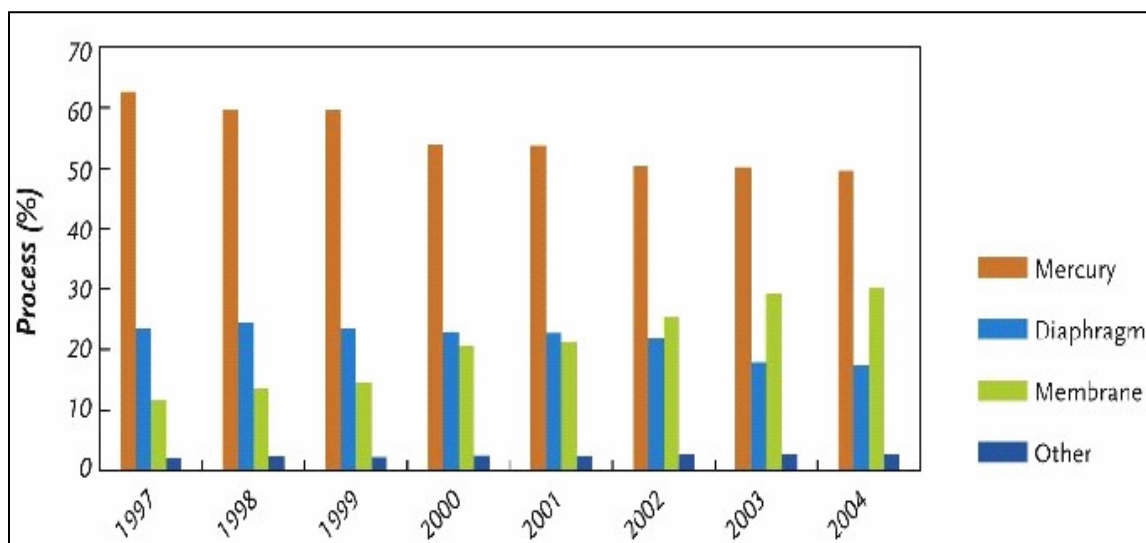


Abbildung 6: Verfahren der Chlorgewinnung in Europa bis 2004<sup>11</sup>

In Deutschland<sup>12</sup> bestand Ende 2003 eine Produktionskapazität von rund 4,4 Millionen Tonnen Chlor pro Jahr. Davon entfielen

- nur mehr 1,2 Millionen Tonnen (27 %) auf das Amalgamverfahren
- 1,0 Millionen Tonnen (23 %) auf das Diaphragmverfahren
- und bereits 2,2 Millionen Tonnen Chlor (50 %) auf das Membranverfahren

<sup>10</sup> Umweltbundesamt Berlin; National Focal Point – IP; Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken in der Chloralkaliindustrie; Dezember 2001

<sup>11</sup> Eurochlor; <http://www.eurochlor.org/index.asp?page=180>; Daten aus dem EPER; 2004

<sup>12</sup> Rothert A.; Positionen zur Chemie mit Chlor - VCI Internetartikel; Nov. 2005

In Österreich existiert nach der Schließung der Chlorproduktion von Solvay in Hallein im Jahr 1996 nur mehr ein Chlorwerk. Dieses wird von der Donau Chemie AG in Brückl (Kärnten) mit einer Jahreskapazität von etwa 60.000 Tonnen nach dem Membranverfahren betrieben. Am Standort wird neben der Chlor-Alkali-Elektrolyse Chlorverflüssigung, Salzsäureherstellung, Herstellung von Eisenchlorid, Hypochlorit, Acetylen und ein Recycling von Beizsäuren betrieben. Durch die Umstellung der Chlor-Alkali-Elektrolyse 1999 vom Amalgamverfahren auf das quecksilberfreie Membranverfahren kam es am Standort in Hinblick auf Quecksilber zu einer deutlichen Verbesserung der Umweltsituation.

**Fazit: >**

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse wird weltweit zunehmend auf das Membranverfahren umgestellt, das gegenüber dem alten Amalgamverfahren deutlich weniger Energieaufwand und geringere Umweltbelastungen aufweist. Diese Entwicklung ist in der EU noch im Laufen, in Deutschland schon sehr weit gediehen, in Österreich bereits abgeschlossen. In Österreich gibt es nur eine Elektrolyse-Anlage, die nach dem Membranverfahren betrieben wird.

## 2.3 PVC und die Vermeidung der Chlorchemie

Der chemische Stoff Chlor birgt ohne Zweifel auf Grund seiner toxikologischen Eigenschaften ein Gefahrenpotenzial, ist aber in vielen Anwendungsbereichen vom Haushalt bis zur Medizin aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Neben der Herstellung von Kunststoffen sind chlorierte aromatische Verbindungen (z. B. Chlorbenzol für die Phenolsynthese), Lösungsmittel und anorganische Chlorverbindungen wichtige Produktgruppen. Die Einsatzgebiete reichen von der Wasserhygiene bis zur Pharmazeutik (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Ein Teil des erzeugten Chlors wird beispielsweise zur Trinkwasserdesinfektion eingesetzt. Hiermit tragen Chlor und Chlorprodukte zur Hygiene speziell in Entwicklungsländern bei.

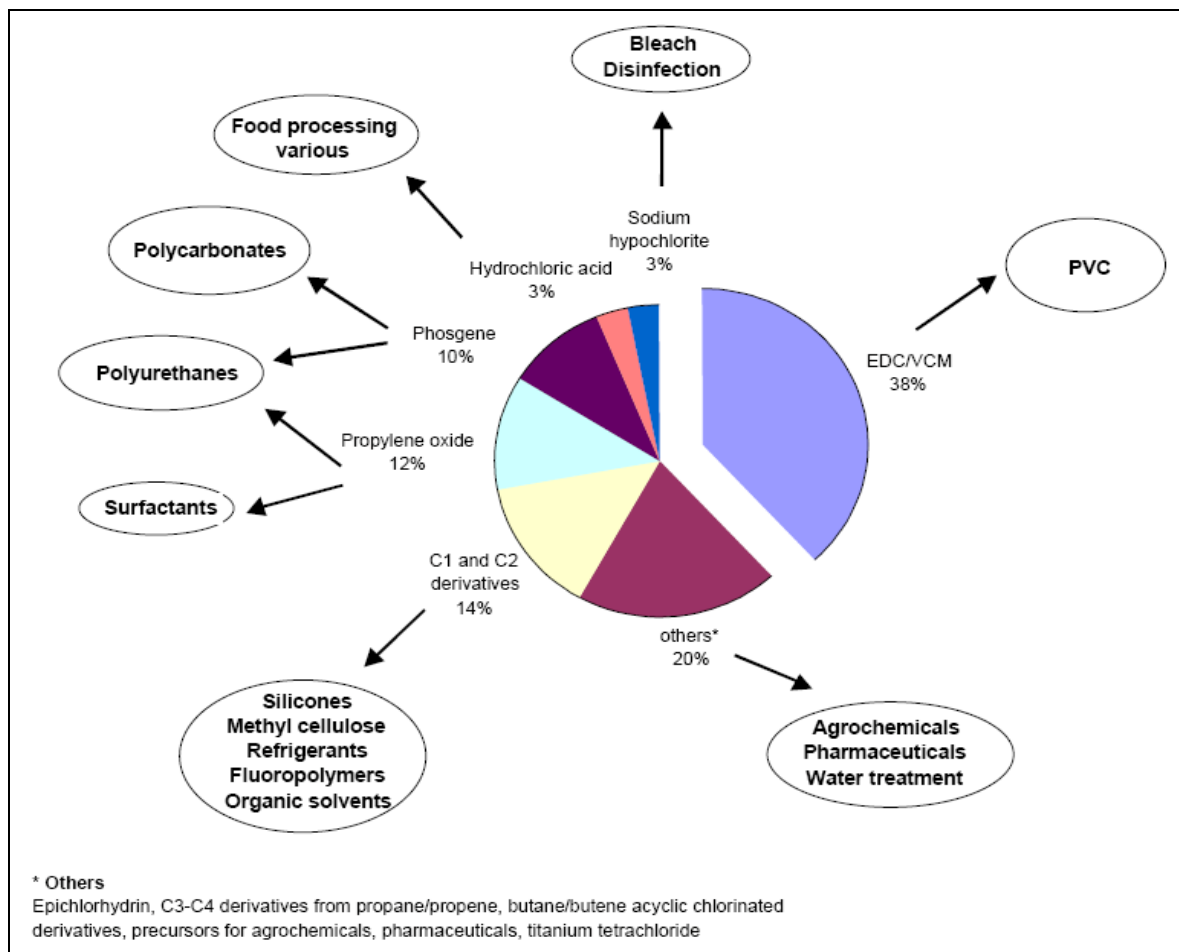
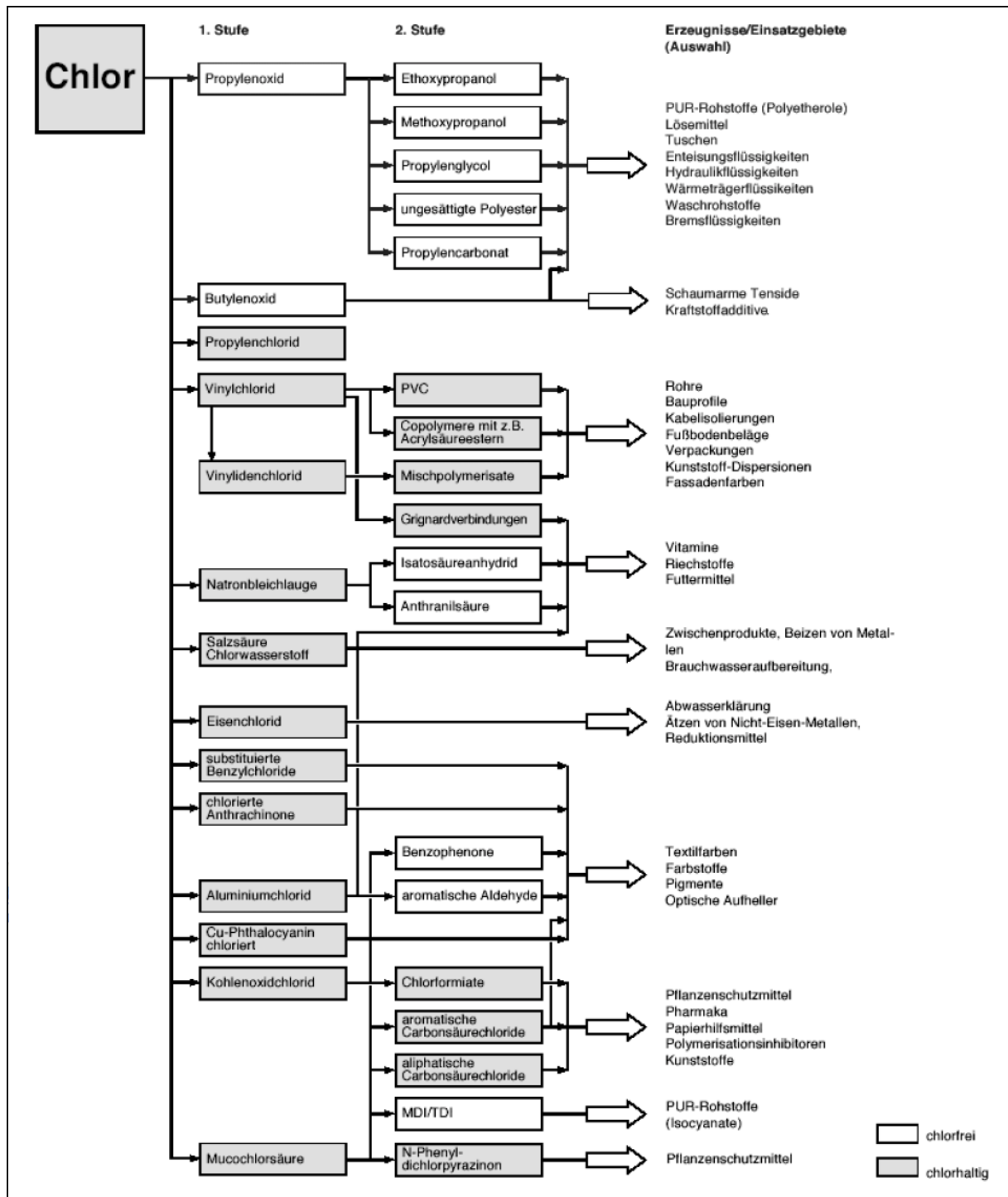


Abbildung 7: Einsatzbereiche von Chlor mit Anteilen<sup>13</sup>

Die Verwendung von Chlor würde daher in diesen Bereichen auch ohne die PVC-Produktion in großem Ausmaß weitergeführt. Daher ist eine Vermeidung von PVC nicht gleichzusetzen mit einer Vermeidung des Stoffs Chlor.

<sup>13</sup> Umweltbundesamt Deutschland; Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU; Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken in der Chloralkaliindustrie) <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/archiv/chloralkaliindustrie.pdf>; Dez. 2001;

Abbildung 8: Der Chlor-Stammbaum<sup>14</sup>**Fazit: 0**

Etwa ein Drittel des hergestellten Chlors wird für PVC verwendet. Auch ohne PVC wird Chlor einerseits für chemische Synthesen vieler - auch chlorfreier - Grundstoffe benötigt, andererseits in der Medizin, der Pharmaproduktion, aber auch der Trinkwasserdesinfektion eingesetzt.

<sup>14</sup> VCI-Publikation; Im Dialog; September 1997



## 2.4 Risiko der technischen Anlagen

Die Anlagen der Produktionskette bis zum PVC-Compound (Granulat) sind als Anlagen mit einem gewissen Gefahren- und somit Risikopotenzial einzustufen. Wie die Entwicklung der letzten Jahrzehnte sowohl im Bereich der Chlorchemie als auch der chemischen Industrie insgesamt zeigt, ist dieses Risiko der Anlagen der Chlorchemie durch Anwendung technischer und organisatorischer Maßnahmen deutlich gesunken, die Eintrittswahrscheinlichkeit größerer Unfälle ist nur mehr gering. Das deutsche Umweltbundesamt fasst dies in seinem Referenzdokument 2001 wie folgt zusammen: „Methoden wie HAZOP (Gefahren- und Durchführbarkeitsstudie), HAZAN und QRA dienen dazu, dass der Betrieb der Chlorherstellung ein vernachlässigbares Risiko für die Beschäftigten, die Nachbarschaft und die Umwelt darstellt“<sup>13</sup>.

Dies zeigt sich auch in der Zahl der Prozessstörungen und Ausfälle in der europäischen Chlorindustrie, die einen deutlichen Rückgang um 75 Prozent von 67 (2001) auf 15 im Jahr 2005 aufweisen. Die Stabilisierung dieses niedrigen Wertes stellt auch das Ziel der Chlorindustrie für das Jahr 2010 dar (Abbildung 9).

Das Bewusstsein der Betriebe für einen verantwortungsvollen Umgang mit dem Risiko zeigt auch der hohe Anteil von 35 der 41 EU-Betriebe der Chlorchemie, die nach Responsible Care, dem Sicherheits- und Umweltsystem der chemischen Industrie, zertifiziert sind<sup>11</sup>.

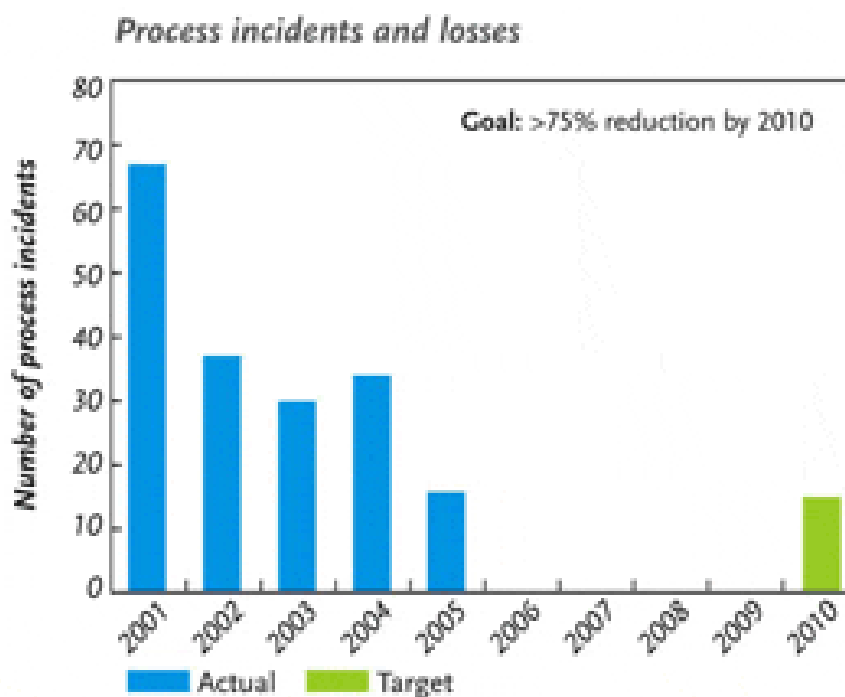


Abbildung 9: Prozessstörungen in der Chlorchemie<sup>11</sup>



**Fazit: 0**

Wie die meisten großtechnischen Anlagen sind auch die Anlagen der Chlorchemie gefahrgeneigte Anlagen. Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte zeigen einen deutlichen Rückgang der Störungen mit maßgeblichen Auswirkungen in den Anlagen der Produktionskette von PVC in Europa. Das Risiko der Anlagen kann daher mit technischen Mitteln auf ein niedriges Niveau reduziert werden, zukünftig sind weitere Reduktionen vorgesehen.

## 2.5 Umweltbelastungen durch die Chlorchemie

Die Umweltbelastung durch die Chlorchemie war einer der wesentlichen und meist diskutierten Themenbereiche von Umweltgruppierungen. Hauptpunkt war die Emission von Quecksilber aus den Amalgamanlagen (siehe auch Chlor-Alkali-Elektrolyse), aber auch Emissionen von Vinylchlorid und Chlorgas (siehe auch „PVC-spezifische Belastungen am Arbeitsplatz“).

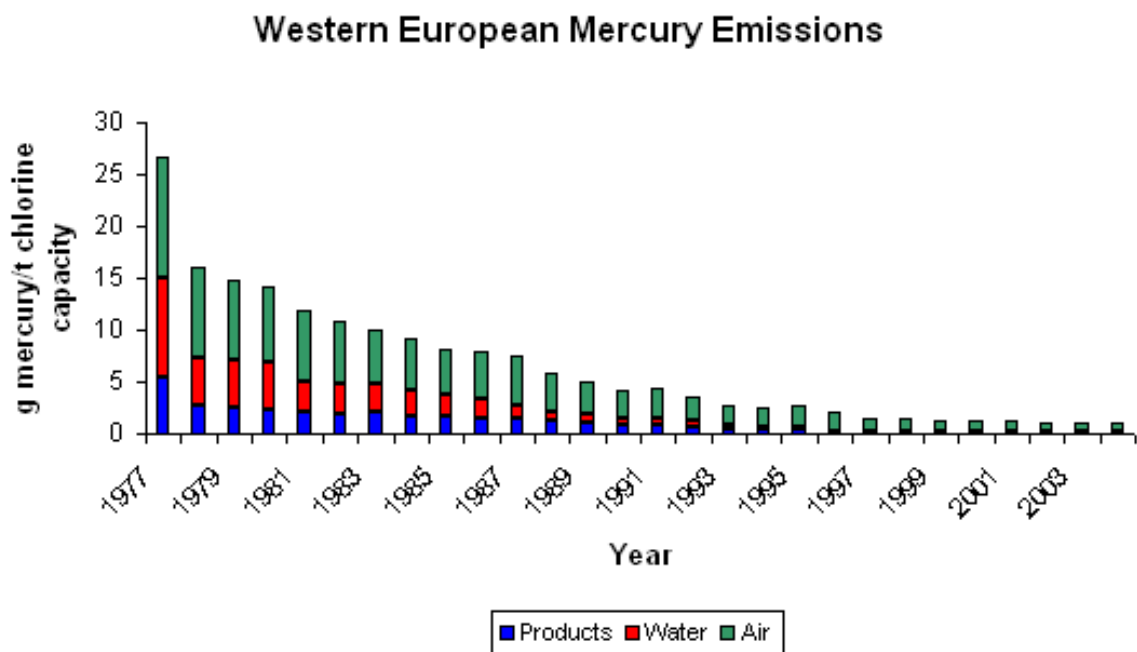


Abbildung 10: Quecksilberemissionen der Chlorherstellung in Westeuropa<sup>11</sup>

Die gesamten **Quecksilberemissionen** sind von 1984 bis 2004 in Westeuropa um ca. 90 % (Abbildung 10) und in Deutschland von 1972 bis 2003 um fast 99 % gesunken<sup>10</sup>. Der Großteil dieser Verbesserung im Bereich der Chlorchemie liegt in der Optimierung von Produktionsprozessen und anderweitig in der Umstellung auf Membranverfahren, mit dem alle neu errichteten Anlagen ausgestattet werden. Schrittweise werden nun auch ältere Produktionsstätten darauf umgestellt. Laut der Schätzung des UN-Umweltprogramms vom Dezember 2002 betragen die weltweiten Atmosphäreinträge aus natürlichen Quellen 1.400 - 1.650 Tonnen pro Jahr<sup>15</sup>. Damit verglichen sind die

<sup>15</sup> UNEP (United Nations Environment Programme); Global Mercury Assessment; <http://www.chem.unep.ch/mercury/Report/Chapter6.htm#6.2>; Feb.2003

heutigen Quecksilberemissionen aus Amalgamanlagen (geschätzt auf 87 Tonnen für das Jahr 2000) als unbedeutend anzusehen<sup>16</sup>.

Das Membranverfahren benötigt dabei kein Quecksilber und ist darüber hinaus das Verfahren mit dem besten energetischen Wirkungsgrad. Am einzigen österreichischen Chlorproduktionsstandort wird das Membranverfahren eingesetzt, wobei die Chlorproduktion ausschließlich für die chemische Grundstoffproduktion genutzt wird. Es gibt in Österreich keine PVC-Produktion mehr.

Seit 1985 werden die **Emissionen in Luft und Wasser** der wichtigsten Chlor-Substanzen laufend im europäischen Schadstoffregister EPER festgehalten. Dabei wurde 2004 eine 99 %ige Reduktion der Einbringung in Wasser und eine 93 %ige in die Atmosphäre gegenüber dem Jahr 1985 festgestellt (Abbildung 11).

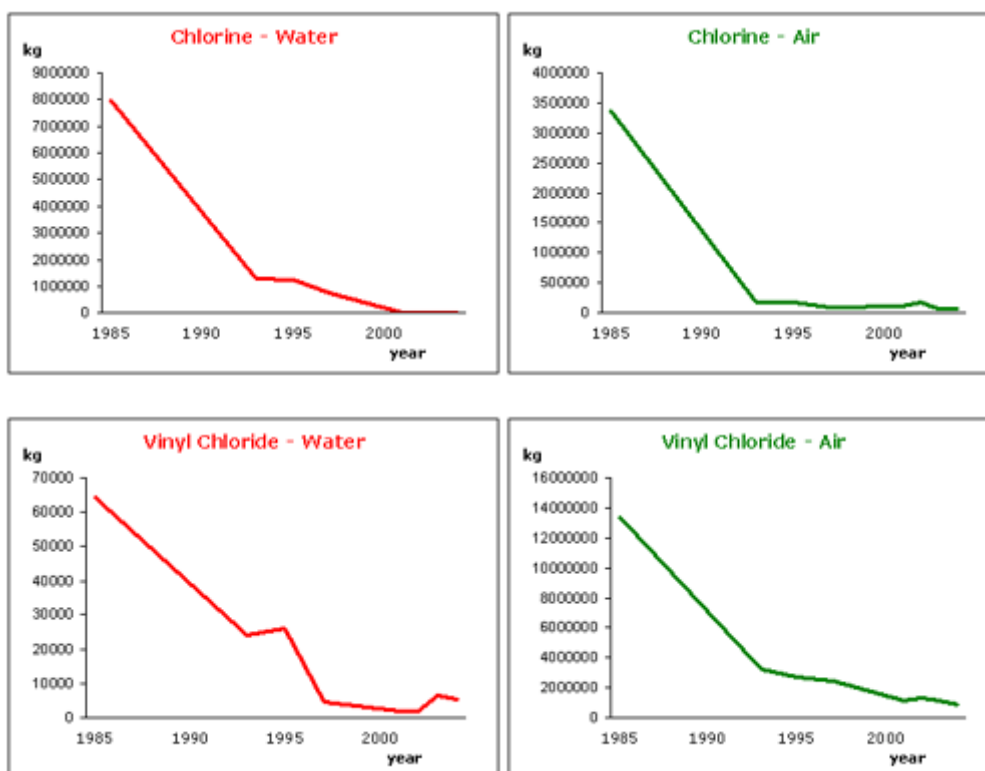


Abbildung 11: Emissionen in Luft und Wasser von Chlor und VC<sup>17</sup>

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Studie auf Basis einer **Lebenszyklusanalyse** (LCA) im Auftrag der Europäischen Kommission wurden im Jahr 2004 die Umweltbelastungen der Produktionskette der Chlorchemie für die PVC-Herstellung betrachtet<sup>18</sup>, sie sind im Folgenden auszugsweise angeführt.

Abbildung 12 zeigt die Anteile der Belastungen in den Wirkungsklassen der Wirkungsanalyse (Impact Assessments). Daraus ist deutlich ersichtlich, dass bei fast

<sup>16</sup> VCI Verband der chemischen Industrie; Die Zukunft der Amalgam-Anlagen in Deutschland; November 2006

<sup>17</sup> Eurochlor; Chlorine Online, How is chlorine made; <http://www.eurochlor.org/index.asp?page=76> ?; Daten aus dem EPER ;2004

<sup>18</sup> Europäische Kommission; Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials; Commissioned by the European Commission; July 2004

allen Wirkungsklassen die Energiebereitstellung den größten Teil der Umweltauswirkungen zu verantworten hat. Im Detail sind dies bei EP (Eutrophication Potential), TETP (Terrestrial Ecological Toxicity Potential), GWP (Global Warming Potential), AP (Acidification Potential) über 50 % und bei der Primärenergie und HTP (Human Toxicity Potential) sogar über 80 % bzw. 90 %. Bei zwei von acht Impactklassen ist der Anteil der Chlorchemie am größten. Bei AETP (Aquatic Ecological Toxicity Potential) ist dies durch die Quecksilberemissionen der Elektrolyse nach dem Amalgamverfahren bedingt, die durch den Ersatz dieser Technologie an Bedeutung verlieren werden. Bei POCP (Photochemical Ozone Formation Potential) liegt die Ursache beim Rohstoff Salz.

Maßnahmen zur Reduktion der Belastungen bei der PVC-Herstellung müssten daher vor allem bei der Energiebereitstellung ansetzen.

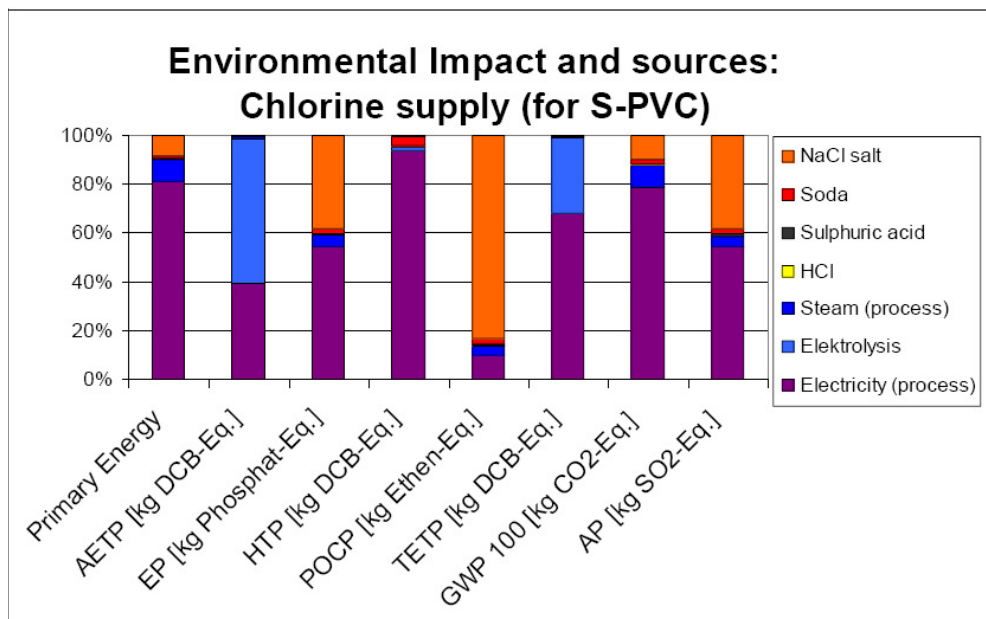


Abbildung 12: Umweltauswirkungen durch die Chlor-Produktion<sup>18</sup>

Bei der Synthese des Vinylchloridmonomers (Abbildung 13) verursacht die Herstellung des Ethen (Ethylen) den größten Teil der Belastungen. Besonders deutlich wird dies bei der Primärenergie, bei AETP und TETP. Nur in einer von acht Wirkungsklassen (HTP) hat die Chlorchemie den größten Einfluss.

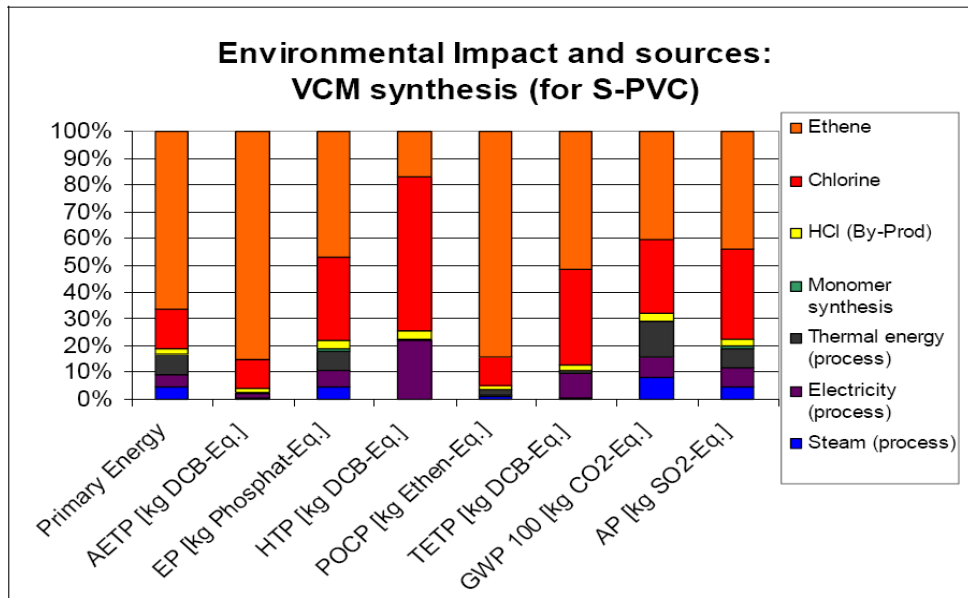


Abbildung 13 Umweltauswirkungen durch die VCM Synthese<sup>18</sup>

Die spezifischen chlorchemischen Emissionen spielen nach den Ökoprofildaten keine große Rolle. Das toxische Potenzial wird vor allem durch Emissionen beeinflusst, die bei der Erzeugung von Strom und Dampf durch das Verbrennen von Kohle, Öl etc. entstehen und bei den Raffinerie- und Crackprozessen zur Erzeugung des organischen Teils in chlorchemischen Produkten. Während bei Chlor-chemischen Produkten mehr Strom für die Elektrolyse benötigt wird, ist der Bedarf an fossilen organischen Rohstoffen geringer als bei chlorfreien Produkten. Bei PVC überwiegen die Belastungen aus dem Ethylen im Vergleich zu Chlor.

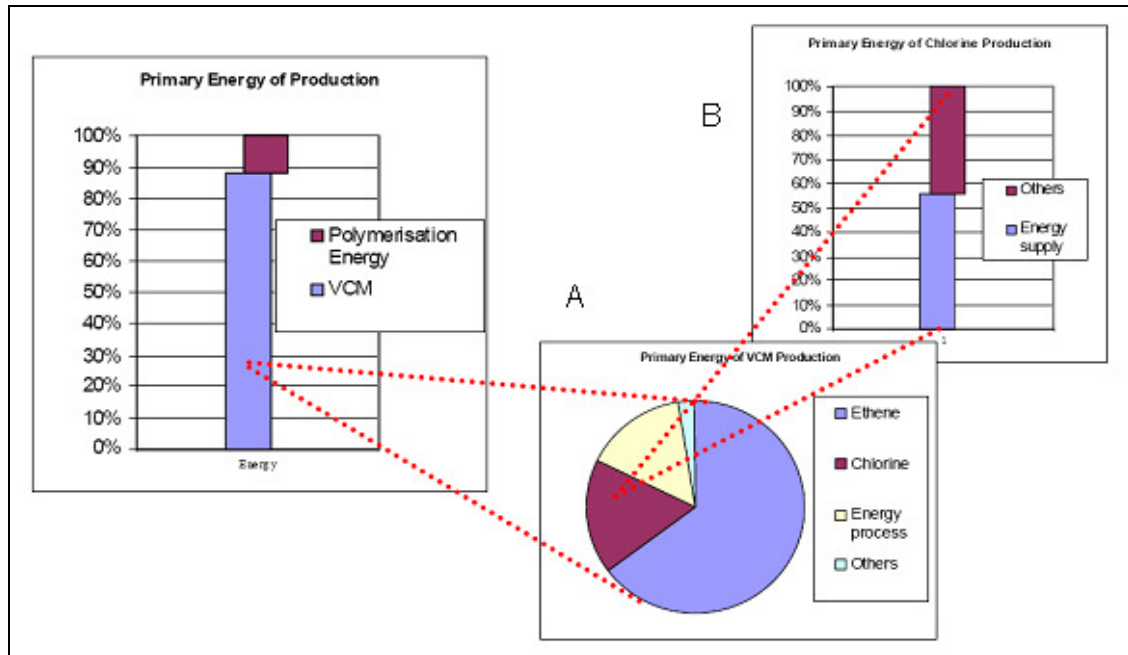
### **Fazit: 0**

Die Quecksilberemissionen in der EU sind in den letzten Jahren insgesamt deutlich gesunken, die Emissionen der einzelnen Standorte liegen unterhalb der gesetzlichen Vorgaben, sie werden durch den weiteren Ersatz von Altanlagen noch weiter reduziert. Dies wird in den kommenden Jahren eine vollständige Bereinigung der Situation bringen. In Österreich gibt es keine Quecksilberemissionen durch die Chlorchemie, da kein Amalgamverfahren mehr im Einsatz ist.

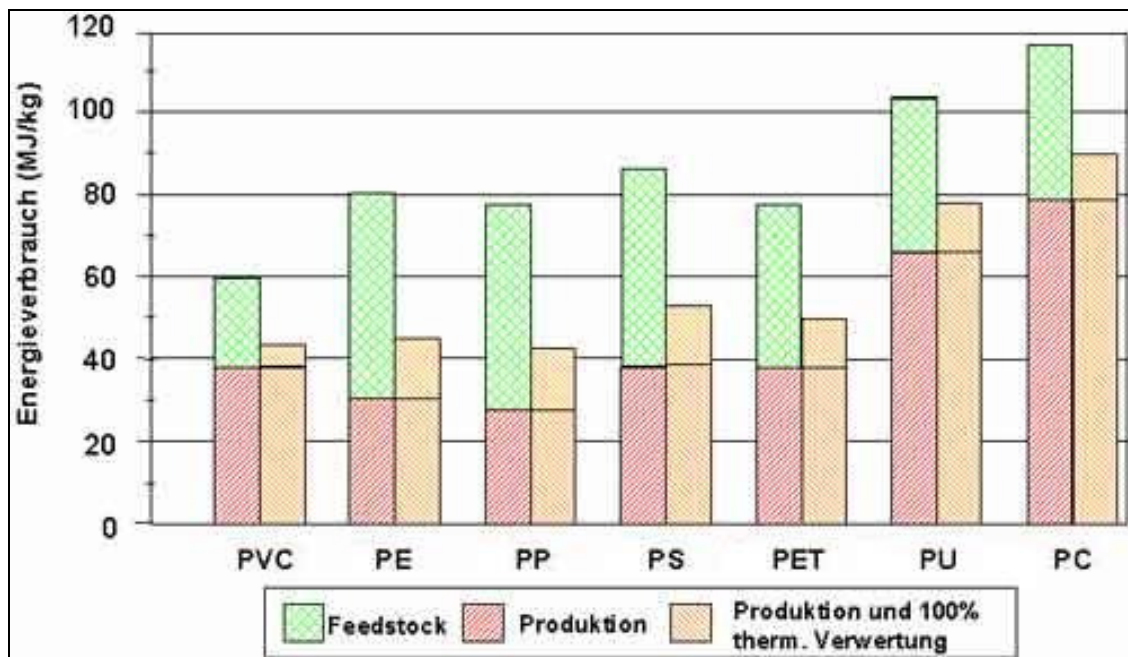
Die Emissionen von Chlor und Vinylchlorid in Luft und Wasser konnten in den letzten 20 Jahren um mehr als 90 % reduziert werden und stellen kein spezifisches Problem mehr dar. Die verbliebenen Belastungen über den gesamten Lebenszyklus kommen zum größeren Teil aus nicht chlorespezifischen Quellen.

## **2.6 Energiebedarf und Klimarelevanz**

Die Prozesse der Chlorchemie gelten oft als hauptverantwortlich für den angenommenen hohen Energieverbrauch der gesamten PVC-Herstellung. Betrachtet man die in der von der EU beauftragten LCA-Studie<sup>18</sup> angegebenen Energieaufwendungen über den gesamten Lebenszyklus (Abbildung 14), so zeigt sich, dass der Großteil des Energieverbrauchs durch die Herstellung des Ethens begründet ist, das für viele Kunststoffe als überwiegender Ausgangsstoff dient.

Abbildung 14: Energieverbrauchsschema PVC-Produktion<sup>18</sup>

Ein Vergleich des Energieaufwandes mit anderen Kunststoffen zeigt dementsprechend, dass PVC einen geringeren spezifischen Energieverbrauch vor allem im Bereich Feedstock (=Herstellung des industriellen Grundstoffs) verursacht (Abbildung 15)

Abbildung 15: Energieverbrauch in der Kunststoffherstellung<sup>19</sup>

Der Prozess der Elektrolyse ist dennoch ein energieaufwändiger Schritt, bei dem weiterer Optimierungsbedarf gegeben ist. Den geringsten Energieeinsatz für die Chlorherstellung weisen Anlagen mit Membranverfahren auf. Die europäische Chlor-

<sup>19</sup> Koller U; Umweltberatung Bayern; Fachinformation „Umwelt und Gesundheit“;  
[http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/pvc\\_2000\\_abb.htm](http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/pvc_2000_abb.htm); April 2000

Alkali-Industrie wird ihre alten Amalgamanlagen schrittweise bis 2020 stilllegen<sup>20</sup> (Konversion zum Membranverfahren) und so eine weitere Reduzierung des Energieverbrauchs erreichen. Im Jahr 1999 wurden zum Beispiel Kapazitäten von insgesamt 400.000 Tonnen Chlor pro Jahr auf das energiesparendere Membranverfahren umgestellt. Der Bedarf an Elektrolysestrom verringerte sich dadurch gegenüber den bisherigen Verfahren um ca. 340 GWh pro Jahr<sup>21</sup>. Für die Chlorherstellung lag im Jahr 2000 für Deutschland ein Strombedarf von ca. 11 TWh vor, der bis zum Jahr 2020 auf ca. 8,5 TWh reduziert werden könnte<sup>22</sup>. Dem prognostizierten Rückgang des Strombedarfs liegt vor allem der Wechsel der Produktionstechnologie vom Amalgam- zum Membranverfahren zugrunde. Diese Umstellung allein bewirkt eine Minderung des Gesamtenergieverbrauchs um durchschnittlich 15 % (bei einer alten Amalgamanlage sogar bis zu 30 %)<sup>23</sup>. Für Neuanlagen wird heute nur noch das Membranverfahren eingesetzt<sup>24</sup>.

Durch die Verbesserung bei den Verfahrensprozessen und durch Optimierungen der Rohstoffeffizienz konnte der spezifische Energieverbrauch von 1990 bis 2005 auf 62 % verringert werden (Abbildung 16). Dies führte zu fast analogen prozentuellen Reduktionen beim Gesamtenergieverbrauch und den dadurch bedingten Kohlendioxidemissionen. Bis 2010 sind weitere Reduktionen geplant.

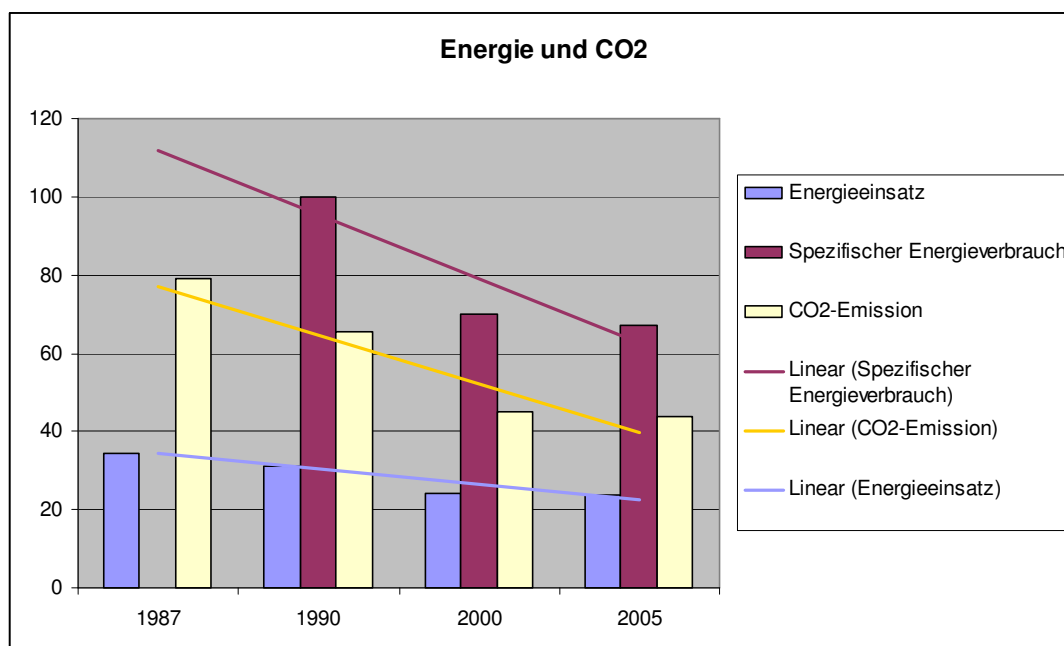


Abbildung 16: Energieverbrauch (in Mio t SKE) und CO<sub>2</sub> Emissionen (in Mio t)<sup>25</sup>

<sup>20</sup> VCI (Verband der chemischen Industrie); Die Zukunft der Amalgam-Anlagen in Deutschland; November 2006

<sup>21</sup> RWI Essen; Die Klimaschutzerklärung der deutschen Industrie vom März 1996 – eine abschließende Bilanz; Monitoring-Bericht 2000, Fortschrittsberichte der Verbände

<sup>22</sup> wik-Consult – FhG Verbund Energie; Bericht, Bad Honn; Dezember 2006

<sup>23</sup> KfW Bankengruppe, Abteilung Volkswirtschaft; Energie effizient nutzen: Klima schützen, Kosten senken, Wettbewerbsfähigkeit steigern; [http://www.competence-site.de/energie.nsf/4C4FCDAC981D3E3FC1257076002706D7/\\$File/sonderpublikation\\_energieeffizienz\\_kfw\\_bankengruppe.pdf](http://www.competence-site.de/energie.nsf/4C4FCDAC981D3E3FC1257076002706D7/$File/sonderpublikation_energieeffizienz_kfw_bankengruppe.pdf); Juli 2005

<sup>24</sup> Verband der chemischen Industrie (VCI); Zukunft der Alkalichlorid-Elektrolyse-Anlagen nach dem Amalgam-Verfahren; März 2001

<sup>25</sup> VCI; Grafik erstellt nach Daten der Selbstverpflichtung der VCI



Die Herstellung von PVC weist durch den geringeren Anteil an Ethen gegenüber anderen Kunststoffen auch niedrigere CO<sub>2</sub>-Emissionsintensität auf (Abbildung 17). Durch Umstellung auf das Membranverfahren verringerte sich wie oben angegeben der Bedarf an Elektrolysestrom, was einer verringerten Emission um etwa 200.000t CO<sub>2</sub> pro Jahr entspricht<sup>21</sup>.

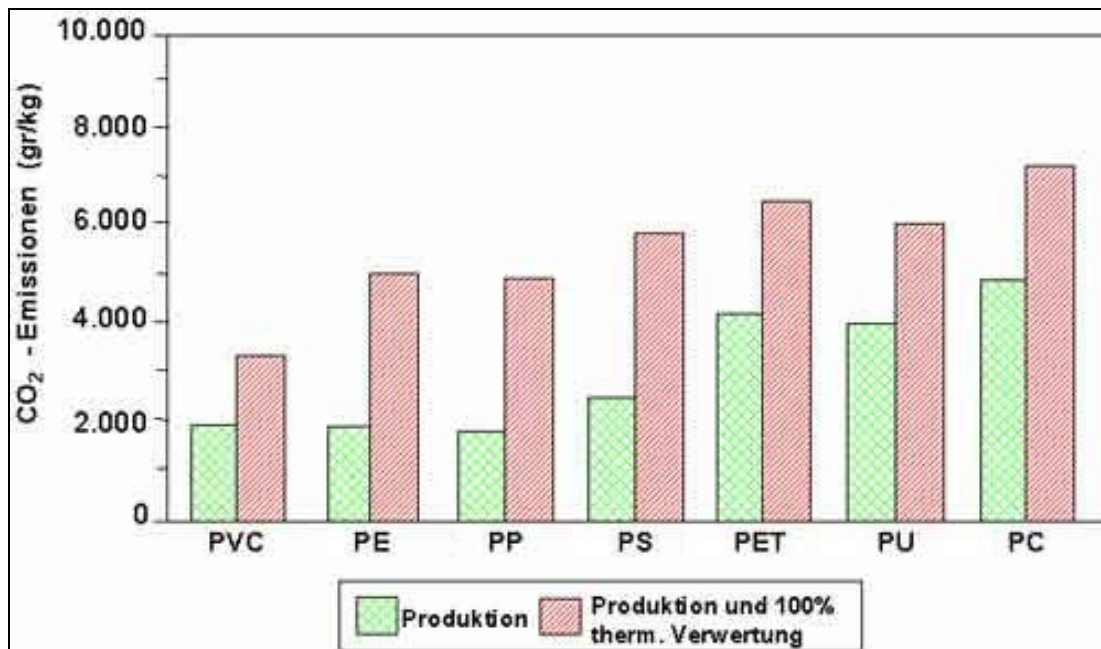


Abbildung 17: CO<sub>2</sub> Emissionen der Kunststoffherstellung<sup>19</sup>

Die relativ günstigen Klimaeigenschaften im unteren Mittelfeld finden sich auch in einer Studie der GUA am Beispiel von Fensterrahmen.

Material	Produkt	CO <sub>2</sub> [mg / kg]	CH <sub>4</sub> [mg / kg]	N <sub>2</sub> O [mg / kg]
<b>PVC-Stahl</b>	Fensterprofil	1878	2982	429,3
<b>Aluminium</b>	Fensterprofil	8077	17806	43,8
<b>Holz</b>	Fensterprofil	631	1214	0,1

Tabelle 1: Emissionen im Vergleich am Beispiel von Fensterrahmen<sup>26</sup>

Die regelmäßige Aktualisierung der Lebenszyklusdaten für PVC durch Partner der PlasticsEurope<sup>27</sup> (Tabelle 2) zeigt auch die kontinuierliche weitere Verbesserung bei Energiebedarf und Emissionen:

PVC-Ökopprofil Werte	Einheit	1994	1998	2004
<b>Primärenergie</b>	MJ / kg	64,9	56,7	56,8
<b>CO<sub>2</sub></b>	g / kg	1750	2000	1770
<b>SOx</b>	g / kg	13	8,2	2,6
<b>NOx</b>	g / kg	15	9,6	3,7
<b>Staub</b>	g / kg	3,9	2,9	0,5
<b>Azidität</b>	%	100	63	20

Tabelle 2: Entwicklung der Ökopprofil-Werte von PVC

<sup>26</sup> GUA GmbH; *The Contribution of Plastic Products to Resource Efficiency*; 2005

<sup>27</sup> PlasticsEurope; *Präsentation PVC-Workshop*, 13.12.2006

**Fazit: +**

Die Herstellung des Grundstoffs PVC weist gegenüber anderen Kunststoffen einen vergleichsweise geringen Energieeinsatz auf und liegt bei Ökovergleichen mit anderen Werkstoffen oft im Mittelfeld. Der Energiebedarf wird vor allem durch die Herstellung des Ausgangsstoffs Ethen verursacht, dem überwiegenden Grundstoff für die meisten Kunststoffe. Die Chlorchemie ist nicht Hauptträger des Energieverbrauchs bei der PVC-Herstellung und hat in den letzten Jahren den spezifischen Energieeinsatz gesenkt.

## ***2.7 Wertschöpfung durch Koppelprodukte der Elektrolyse***

Ausgehend von einer wässrigen Salzlösung werden in der Chlorchemie durch den Elektrolyseprozess Chlor, Wasserstoff und Natriumhydroxid hergestellt. Alle diese Stoffe sind wichtige Produkte für weitere Anwendungen in der Industrie, was verbesserte Ressourceneffizienz bringt und die Gesamtwertschöpfung des Prozesses erhöht.

Speziell die beim Elektrolyseprozess entstehende Natronlauge stellt keinen „Abfall“, sondern ein wichtiges Koppelprodukt dar, das auch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses maßgeblich unterstützt. Natronlauge ist eine Base, die in verschiedenen Bereichen der chemischen, pharmazeutischen, Textil-, Papier-, Metall- und Nahrungsmittelindustrie oder auch in der Landwirtschaft und zur Behandlung von Wasser und Abwasser eingesetzt wird.

**Fazit: +**

Die Chlorchemie führt zu den vollwertigen Hauptprodukten Chlor und Natronlauge. Natronlauge ist daher kein unerwünschter Abfall, sondern ein Koppelprodukt, das einen zusätzlichen Deckungsbeitrag für die Unternehmen liefert. Sie stellt einen maßgeblichen Industriegrundstoff dar und erzeugt Wertschöpfung in den Anwendungsbereichen.

## ***2.8 Transportrisiko***

Die Zwischenprodukte der Produktionskette - speziell im Bereich der Chlorchemie (besonders Chlor und Vinylchlorid) - sind als gefährliche Güter eingestuft, deren Transport generell mit Risiko behaftet ist. Insgesamt nimmt der Gefahrguttransport in Europa deutlich zu, die PVC-Produktionskette macht hier nur einen untergeordneten Anteil aus. Mit den umfangreichen Gefahrguttransportbestimmungen wird auf verkehrsrechtlicher Ebene dem Transportrisiko begegnet.

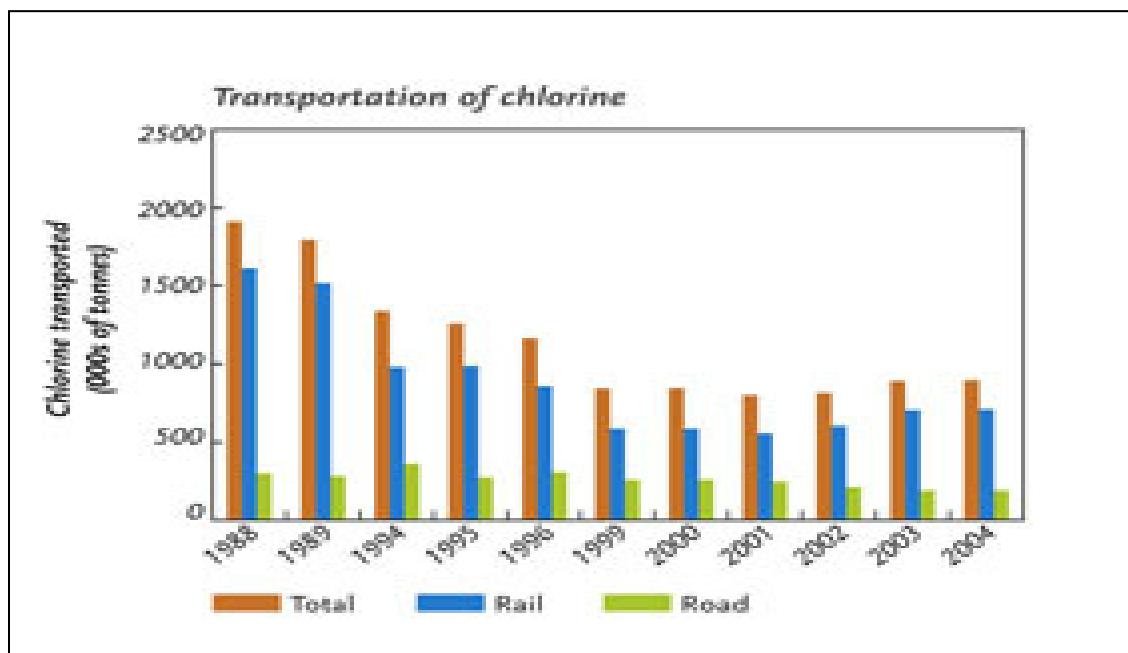
Durch Standortkonzentrationen innerhalb der chemischen Industrie werden bereits mehr als 85 % der EU-Chlorproduktion noch am selben Standort weiterverarbeitet bzw. an einem benachbarten Standort für die Weiterverarbeitung chemischer Produkte eingesetzt. Der Transport von Zwischenprodukten spielt daher nur mehr eine untergeordnete Rolle und ist weiter rückläufig (Abnahme um ca. 50 % seit 1988). Von der verbleibenden Beförderung werden 77 % (bei  $\text{Cl}_2$ ) bzw. 87 % (bei VC) mit der Bahn in gesicherten Spezialwaggons abgewickelt<sup>28</sup> (Tabelle 3).



Chlor Transport in Europa 2004	
Anteil Chlortransport Bahn nach t	712.250
Anteil Chlortransport Bahn in %	77%

Tabelle 3: Chlortransport in Europa<sup>11</sup>

Durch die umfassenden Sicherheitsbestimmungen ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls mit Gefährdungspotenzial nur mehr sehr gering. Laut einer Studie der Bergischen Universität Wuppertal liegt die Wahrscheinlichkeit der Chlorkreissetzung aus Kesselwaggons infolge Bahnbetriebsunfällen bei einem Unfall in 140 Jahren<sup>28</sup>. Dieses Risiko durch den Chlortransport betrifft aber nicht nur die PVC-Herstellung, sondern auch den Einsatz von Chlor in den anderen Anwendungen.

Abbildung 18: Transport von Chlor in Westeuropa<sup>16</sup>

Bei der Produktion von Chlor fällt Natronlauge als Koppelprodukt an. Für den Transport liegt diese als 50 %ige wässrige Lösung vor und kann ohne Probleme über längere Zeiträume gelagert werden<sup>13</sup>. Der Versand von Natronlauge erfolgt in Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeugen. Dieser stellt kein Problem dar, die Auswirkungen bei einem Unfall sind begrenzt.

<sup>28</sup> Pöttsch M.; Risikobewertung des Transports von Chlor mit Binnentankschiffen auf d. Rhein unter besonderer Beachtung des Gefahrgutrechts; Dissertation Bergische Universität Wuppertal; 2004

**Fazit: 0**

Der Transport von Chlor bzw. Vinylchlorid fällt unter die Bestimmungen des Transports gefährlicher Güter. Die Bedrohung ist in Industrieländern allerdings nicht größer als bei Treibstoff- oder anderen Chemikalientransporten. Durch die zunehmenden Standortkonzentrationen in der chemischen Industrie und den überwiegenden Bahntransport gab es in den letzten Jahrzehnten weltweit kaum größere Unfallereignisse. Der Transport von Natronlauge stellt kein Problem dar, da die Auswirkungen bei einem Unfall begrenzt sind.

**2.9 PVC-spezifische Belastungen am Arbeitsplatz**

Die PVC-spezifischen Belastungen für die Arbeitnehmer waren einer der Hauptkritikpunkte der PVC-Gegner. In vielen Argumentationen standen die Vorwürfe, die Herstellung von PVC führe zu Gefährdungen der Arbeitnehmer, speziell durch Belastungen mit Chlorgas und dem krebserregenden Vinylchlorid sowie durch PVC-Stäube, im Mittelpunkt. Auf die damals teilweise berechtigten Vorwürfe von Umweltgruppen wurde mit deutlichen Verbesserungen der Arbeitsplatzsituation reagiert.

Durch Optimierung der bestehenden Anlagen konnten die Belastungen am Arbeitsplatz stark reduziert werden. Die Produktionsanlagen wurden auf geschlossene Anlagen umgestellt. Im Jahr 1999 beschloss der EU-Ministerrat die Aufnahme von Vinylchlorid-Monomeren in die Arbeitsplatzschutzrichtlinie (90/394/EEL). Der maximal zulässige Wert am Arbeitsplatz beträgt demnach 3 ppm. Heute liegen die Konzentrationen in Anlagen für Suspensionspolymerisations-Verfahren deutlich unter 1 ppm. So weisen die Statistiken der Berufsgenossenschaften für seit dem Jahr 1975 Beschäftigte keine Neuerkrankungen an Leberangiosarkomen durch VC mehr aus<sup>29,30</sup>.

Das Verantwortungsbewusstsein der Betriebe für ihre Mitarbeiter wird auch durch den hohen Anteil von „Responsible Care“ zertifizierten Betrieben in der EU dokumentiert<sup>11</sup>.

**Fazit: 0**

In den letzten Jahren sind massive Verbesserungen der Arbeitsplatzbedingungen in Europa erfolgt. Für nach 1975 eingetretene Beschäftigte sind keine PVC-spezifischen Belastungen am Arbeitsplatz mehr gegeben und auch keine Erkrankungen durch Belastungen der Chlorchemie oder Vorprodukte der PVC-Herstellung gemeldet.

**2.10 Arbeitsunfälle in der Chlorchemie**

Auch in diesem Themenbereich hat sich die Situation in der Chlorchemie sowie in der chemischen Industrie generell deutlich verbessert. Durch die geschlossenen Anlagen, den hohen Automatisierungsgrad und umfangreiche Sicherheitseinrichtungen liegt die Anzahl der Arbeitsunfälle in der Rohstoffbereitstellung für PVC (Chlorchemie) in der EU

<sup>29</sup> Arbeitsmedizin Wien und Unfallverhütungsberichte der Deutschen Bundesregierung; Auskunft

<sup>30</sup> Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt: Wissenswertes über PVC, August 2005

deutlich niedriger als der Industriedurchschnitt in Österreich<sup>28, 31</sup>. Bis 2010 ist eine weitere deutliche Verringerung um mehr als 80 % vorgesehen (Abbildung 19).

Bei Unfällen mit Personenschäden, die zu Ausfallzeiten von mindestens einem Tag führen, ist eine Reduzierung um 85 Prozent von 9,47 (2001) bis auf 1,3 (2010) Unfälle pro Million Arbeitsstunden geplant. Außerdem sollen die Unfälle mit Ausfalltagen bei Subunternehmen um 90 Prozent von 15,39 (2001) auf 1,3 Unfälle pro Million Arbeitsstunden gesenkt werden.

Zusätzlich zu den technischen Optimierungen hat die chemische Industrie im Jahr 1992 das Programm „Responsible Care“ ins Leben gerufen, eine freiwillige Initiative mit dem Ziel, die Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltsituation in den Betrieben kontinuierlich und nachhaltig zu verbessern. Im Beobachtungszeitraum 2000 bis 2005 konnten die Ausfallstunden um 16 % und die meldepflichtigen Arbeitsunfälle in der gesamten Branche um 27 % gesenkt werden, obwohl die Beschäftigungsquote um 8 % gestiegen ist<sup>32</sup>.

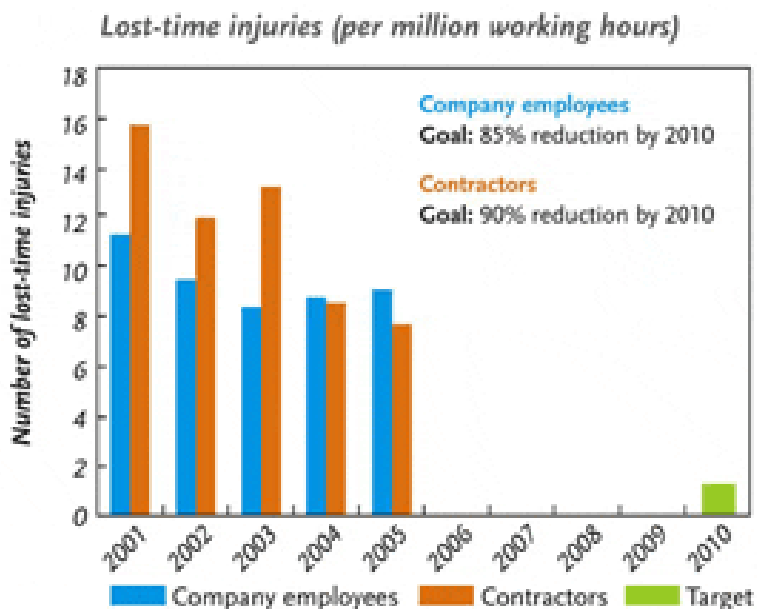


Abbildung 19: Arbeitsunfälle in der Chlorchemie in Europa<sup>11</sup>

#### **Fazit: +**

Im Vergleich mit dem Industrieschnitt ist die Situation der Arbeitssicherheit in der chemischen Industrie und der Chlorchemie in Europa sehr gut, Programme zur ständigen weiteren Verbesserung dienen zum Ausbau der führenden Position.

<sup>31</sup> AUVA; Angaben zu Arbeitsunfällen mit 2000 Jahresarbeitsstunden errechnet

<sup>32</sup> FCIO; Jahresbericht der chemischen Industrie; Wien 2005

### 3 Vom Compound bis zum Endprodukt Schwerpunkt auf Verarbeitung in Österreich, Roh-PVC Import aus EU-Ländern

Polyvinylchlorid (PVC), ein thermoplastischer Kunststoff, wird durch Polymerisation des Monomers Vinylchlorid unter Druck zu PVC-Granulat hergestellt. Diesem werden Zusatzstoffe wie Stabilisatoren, Antistatika, Füllstoffe, Gleitmittel, Schlagzähmodifizierer zugesetzt. Das Endprodukt erhält durch diese Beigabe von Additiven die gewünschten Eigenschaften. Angeboten werden die PVC-Compounds in zwei Formen: als Granulat oder Pulvermischung. Zu unterscheiden ist zwischen festen, die hauptsächlich für Rohre, Fenster oder Rollläden, und flexiblen Compounds, die unter anderem für Kabel, Fußböden, medizinische Anwendungen oder in der Schuhindustrie eingesetzt werden<sup>33</sup>. PVC wird z. B. im Spritzguss- und Strangpressverfahren verarbeitet, lässt sich biegen, schweißen, verformen und verschäumen.

PVC ist wegen seines hohen Chlorgehalts gegen Chemikalien sehr beständig. Es dient deshalb als Hart-PVC im chemischen Apparatebau zum Auskleiden von Behältern oder zur Herstellung von Rohrleitungen, Dachrinnen, Fensterprofilen und Formteilen. Wie eine Erhebung der PVC-Industrie aus dem Jahr 2003 zeigt<sup>34</sup>, liegen die größten Verarbeitungsmengen bei Hart-PVC vor, wo auch steigende Tendenzen vor allem bei Fensterprofilen sichtbar sind (siehe Abbildung 20).

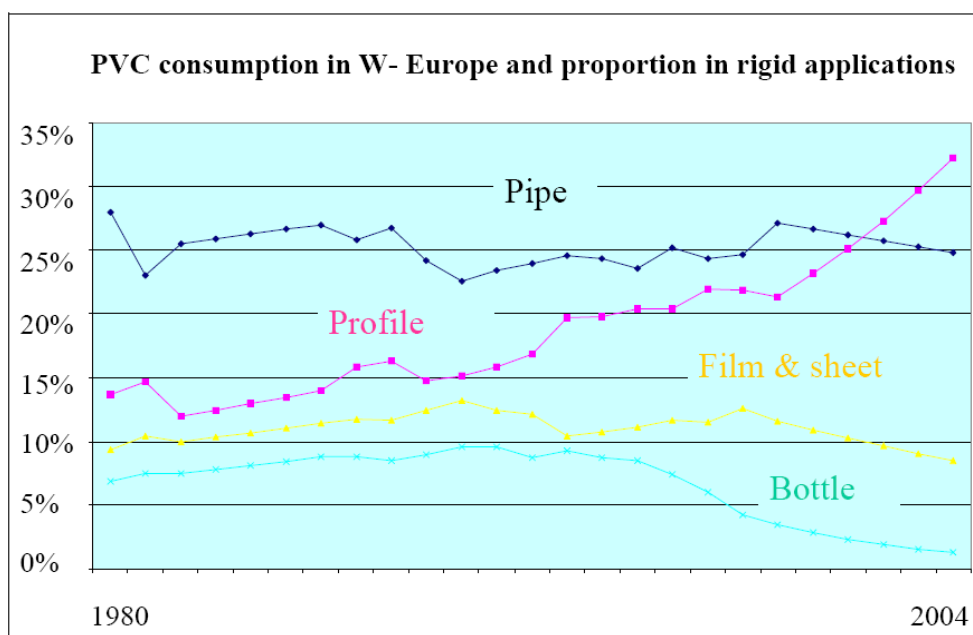


Abbildung 20: Anteile der einzelnen Produkte bei Hart-PVC in W-Europa<sup>34</sup>

<sup>33</sup> API Wien; Internetartikel; PVC-Compounds von EVC auf pflanzlicher Basis;

[http://www.pvc.at/d/news\\_at\\_0205.htm](http://www.pvc.at/d/news_at_0205.htm); Feb. 2005

<sup>34</sup> European Commission; Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials; Commissioned, July 2004

In Österreich gibt es keine Produktion von PVC-Granulat mehr. Die einzige Anlage der Solvay wurde 1995 geschlossen<sup>35</sup>. Deshalb sind alle in Österreich verwendeten PVC-Produkte entweder aus importiertem PVC-Granulat bzw. importierten PVC-Mischungen hergestellt oder werden als PVC-Produkte direkt importiert<sup>36</sup>. Weich-PVC Produkte machen bei den in Österreich hergestellten Produkten nur mehr etwa 10 % bis 15 % der Harzverarbeitung aus, dies betrifft vor allem die Bereiche Kabel und Planen (Abbildung 21).

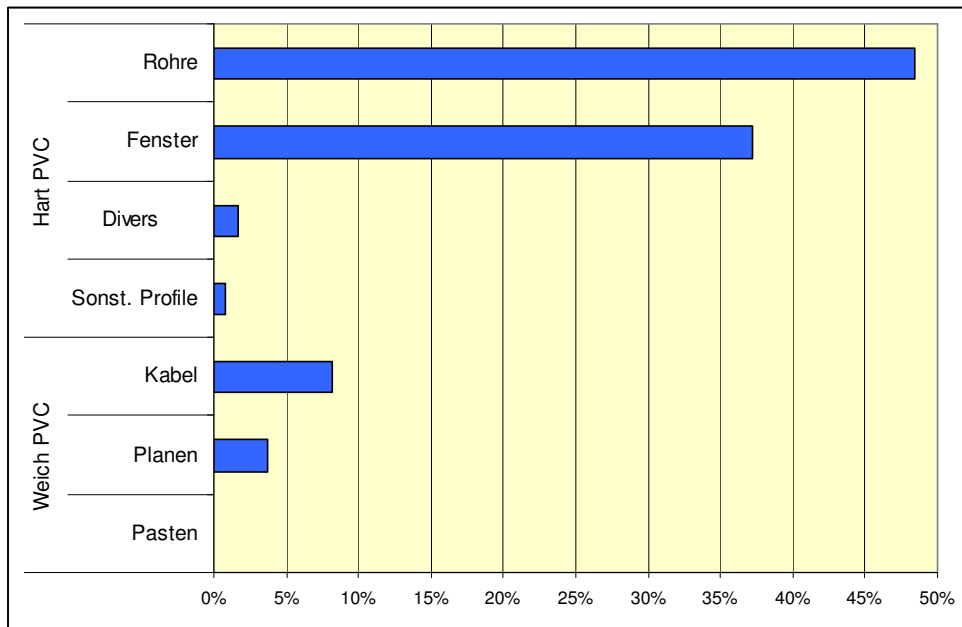


Abbildung 21: Verarbeitung von PVC-Harz in Österreich<sup>36</sup>

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich vorwiegend auf die Situation der Verarbeitung in Österreich, beim importierten Granulat vor allem auf Herkunftsländer in der EU und Westeuropa.

### 3.1 Additive

Ein PVC-Compound benötigt verschiedene Additive, die das Material auf unterschiedliche Art und Weise modifizieren und ihm dadurch einen weiten Anwendungsbereich öffnen. Die wichtigsten Additive für PVC sind Stoffe zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften wie Temperatur-, Licht- und Wetterbeständigkeit, Zähigkeit, Elastizität und Transparenz, auch Stoffe zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Farbpigmente. Dies sind Wärmestabilisatoren, UV-Stabilisatoren, Füllstoffe, Antioxidantien, Farbpigmente, Flammenschutzmittel, Gleitmittel, etc. Stabilisatoren sind für Hart-PVC spezifisch, die restlichen Additive werden auch bei anderen Kunststoffen verwendet<sup>37</sup>. Der Anteil der Additive beträgt bei Hart-PVC 10-25 %.

<sup>35</sup> Greenpeace; *Chlorchemie Situation in Österreich: Situation in Österreich*;  
<http://www.greenpeace.at/1154.html>

<sup>36</sup> API Wien; *Daten über die Anwendung von PVC-Harz in Österreich basierend auf Statistik Austria*; pers. Mitteilung

<sup>37</sup> UBA-DE, Fraunhofer Institut, Ökopool; *Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe*;  
 Februar 2003

	PVC (rein)	Stabilisatoren	Weichmacher	Füllstoffe	Sonstige
Fenster	80-90%	3-5%	/	3-5%	5-10%
Rohre	95-98%	1-5%	/	/	/
Kabel	40-50%	1-2%	20-30%	30-40%	/
PVC-Bodenbeläge	20-50%	1-2%	15-30%	40-50%	0-10%
PVC-Hartfolien	90-95%	1-2%	/	/	5-10%

Tabelle 4: PVC-Produkte und ihre Zusammensetzung in Deutschland<sup>38</sup>

### 3.2 Stabilisatoren

Stabilisatoren werden dem Compound beigesetzt, um den Kunststoff zu stabilisieren und bestimmte unerwünschte Effekte zu unterbinden. Prozess- und Hitzestabilisatoren sind für die PVC-Verarbeitung notwendig. Sie verleihen dem PVC ausreichende Hitzestabilität für die Verarbeitung und dem Fertigartikel die erforderliche Alterungsbeständigkeit während seiner Gebrauchsdauer<sup>39</sup>.

Für eine Stabilisierung können Blei-Barium-Zink-, Calcium-Zinkstabilisatoren, Calcium-organische und metallfreie Stabilisatoren eingesetzt werden. Cadmium-basierte Stabilisatoren werden seit 2001 aufgrund einer freiwilligen Selbstverpflichtung der PVC-Branche europaweit nicht mehr eingesetzt. In Österreich wurde nach dem Ausstieg aus Cadmium nun auch der Einsatz von Blei verringert. Dies differiert je nach Produktgruppe und Unternehmen. In der EU ist der Komplettausstieg bei Blei bis 2015 vorgesehen<sup>40</sup>. Als Alternative stehen für viele Bereiche Systeme auf Calcium-Zinkbasis oder Mixed-Metal Systeme zur Verfügung. Die Stabilisatoren werden in Werken, die nach dem derzeitigen Stand der Technik ausgerüstet sind, in nicht staubender Form verarbeitet<sup>19</sup>.

International sind die ökologischen Intentionen geringer als in Österreich. Dementsprechend weist auch das deutsche Umweltbundesamt 2003 darauf hin, dass die vollständige Substitution des Cadmiums bisher nicht überall erfolgt ist<sup>41</sup>, was an Importen aus Fernost liegen könnte<sup>42</sup>. Die kurzfristige vollständige Substitution des Cadmiums, die Realisierung der Substitution des Bleis und eine Nichtausweitung des Organozinnverbrauchs werden als notwendig angeführt.

<sup>38</sup> AgPU; Produktions- Verbrauchs- u. Abfalldaten für Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung; 2004

<sup>39</sup> Bodo Möller Chemie GmbH- Offenbach am Main; Prozess- und Hitzestabilisatoren, <http://www.bm-chemie.de/content/de/kunststoffadditive/hitzestabilisator.shtml>

<sup>40</sup> Fraunhofer Institut ICT; Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC); Pfinztal, Mai 2005

<sup>41</sup> UBA DE; Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC; 14.07.2003

<sup>42</sup> BMLFUW; Gesamtbericht; Behandlungs- und Verwertungswege für PVC-Abfälle; Dezember 2002

Österreich hat diesen Weg bereits beschritten, der Import von cadmiumhaltigen PVC-Produkten ist verboten, es sind auch keine Organozinnverbindungen als Substitute im Einsatz. Der Ausstieg aus der Bleiverwendung ist im Fensterbereich weitgehend abgeschlossen. Bei den Rohrherstellern wird entsprechend der Umsetzung der produktspezifischen Prüfgrundlagen des GRIS (Güteschutzverband Rohre im Siedlungswasserbau) und des ÖVGW-GRIS (Güteschutzverband Rohre im Gas- und Wasserfach) der Blei-Ausstieg bei Kanal- und Trinkwasserrohren bereits 2007 bei den maßgeblichen österreichischen Herstellern abgeschlossen. Diese stellen etwa 90 % des österreichischen Marktes dar. Maßgebliche Rohrhersteller halten diese Verpflichtung bereits EU-weit ein.

Grundsätzlich werden bei Hart-PVC-Produkten keine Stabilisatoren freigesetzt, da diese in die Kunststoffmatrix eingebettet sind<sup>43</sup>. Dies wird in technischen Prüfungen bei den einzelnen Produkten auch überwacht. Es wäre nur bei starkem Abrieb oder höheren Temperaturen Vorsicht geboten, da hier die Kunststoffmatrix erweicht und geringe Mengen Schwermetalle freigesetzt werden können. Allerdings liegen bei der Nutzung keine Anwendungen vor, bei denen diese Bedingungen auftreten können. Der Schnitt von PVC-Profilen erfolgt wegen produkttechnischer Kriterien durchwegs unter Vermeidung von Überhitzungen des Materials mittels Diamantsägen mit Absaugungen. Es verbleibt beim Bleieinsatz somit der stoffstromtechnische Aspekt, dass ein bedenkliches Schwermetall zwar nicht freigesetzt wird, aber in den Anwendungen von PVC-Produkten verteilt wird, was eine spätere Aufkonzentrierung in einer Senke erschwert.

#### **Fazit : 0**

Stabilisatoren müssen dem Compound beigesetzt werden, um den Kunststoff verarbeitbar und beständig zu machen. In Österreich ist der Ausstieg aus Cadmium abgeschlossen, auf Blei wird bei der Rohr- und Fensterherstellung in Österreich entsprechend interner produktspezifischer Vorgaben bereits weitgehend verzichtet. EU-weit wird der Ausstieg aus Blei bis 2015 erfolgen.

### **3.3 Farbpigmente**

Die Farbgebung ist ein wichtiger Teil der Produktgestaltung. Wesentlich bei Farben sind neben den Kosten Farbintensität, Farbcharakter, Dauerhaftigkeit, etc. In Österreich werden in den wesentlichen Produktbereichen nach den Vorgaben des GRIS keine blei- oder chromhaltigen Pigmente mehr eingesetzt. Die Mischungen und Dosierungen werden in geschlossenen Systemen durchgeführt und die Abluft gefiltert, so dass keine Belastung des Personals und der Umgebung entsprechend den arbeitsmedizinischen Bestimmungen vorliegen<sup>43</sup>.

Die europäischen PVC-Hersteller haben im Oktober 2001 ihren Verzicht auf bleihaltige Stabilisatoren bis 2015 erklärt. Es ist daher vorgesehen, dass spätestens zu diesem Zeitpunkt auch auf bleihaltige Pigmente verzichtet wird. Laut deutschem Umweltbundesamt gibt es für bleichromatische Pigmente für alle Einsatzgebiete technisch gleichwertige Alternativen.

<sup>43</sup> UBA DE; Substitution von PBT\*- Stoffen in Produkten und Prozessen, Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe für die Hersteller und gewerblichen Anwender gewässerrelevanter Chemischer Produkte; Teil5; Berlin, Februar 2003

**Fazit: 0**

Derzeit werden in Österreich von den wesentlichen Herstellern keine blei- oder chromhaltigen Farbpigmente mehr verwendet. Ein Ausstieg aus blei- und chromhaltigen Farben ist in der gesamten EU bis spätestens 2015 vorgesehen.

**3.4 Energiebedarf der Verarbeitung**

Die Verarbeitung des Compounds weist vom Energieeinsatz innerhalb der gesamten Produktionskette nur untergeordnete Bedeutung auf. Erwähnenswert ist, dass PVC für bestimmte Anwendungsbereiche bereits bei 150 °C verarbeitet werden kann. Dies liegt unter den üblichen Verarbeitungstemperaturen von Kunststoffen<sup>44</sup>, wodurch sich in diesen Fällen energetisch leichte Vorteile ergeben.

Den geringeren Energieverbrauch der Verarbeitung von PVC im Vergleich zu anderen Kunststoffen stellt auch die von der EU in Auftrag gegebene LCA-Studie zu PVC fest: „Energieverbrauch und Emissionen bei Compoundieren und Verarbeiten von PVC sind innerhalb der Prozesskette relativ niedrig“<sup>45</sup>.

**Fazit: 0**

Der Verarbeitungsschritt weist vom Energieeinsatz innerhalb der gesamten Produktionskette nur untergeordnete Bedeutung auf.

**3.5 Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz**

Bei der PVC-Verarbeitung können Stäube entstehen, die in hohen Konzentrationen bei den betroffenen Arbeitern zu Staublungen führen können. In diesem Bereich hat sich die Situation in den letzten Jahrzehnten in Europa deutlich verbessert. Die Stabilisatoren für Compounds werden nach dem Stand der Technik in nicht staubender Form oder in für Pulverapplikation geeigneten Anlagen verarbeitet<sup>29</sup>.

Der aktuelle MAK-Wert beträgt 5mg/m<sup>3</sup> in Österreich und Deutschland (in der Schweiz 1mg/m<sup>3</sup>) und wird voraussichtlich zukünftig weiter verschärft. Diese Werte werden sowohl in Österreich und Deutschland, als auch in der Schweiz eingehalten.

**Fazit: 0**

Die Verarbeitung erfolgt nach dem Stand der Technik in Europa in nicht staubender Form oder in für Pulverapplikation geeigneten Anlagen, wodurch Arbeitsplatzbelastungen vermieden werden.

<sup>44</sup> Leoni Gruppe; Umwelterklärung, 12.2.2004

<sup>45</sup> PE Europe GmbH; Ökobilanzierung von PVC und wichtigen Konkurrenzwerkstoffen; Im Auftrag der Europäischen Kommission; April 2004



## 4 Die Nutzung von PVC-Produkten

### Anwendungen in Österreich

In diesem Abschnitt wird die Nutzung der Hart-PVC-Produkte in den Anwendungsbereichen in Österreich betrachtet.

#### 4.1 Wesentliche Anwendungsbereiche von PVC-Produkten in Österreich

PVC-Produkte weisen ein großes Anwendungsspektrum auf. Während anfänglich die kurzlebigen Anwendungen im Verpackungsbereich im Vordergrund standen, liegt mittlerweile eine klare Dominanz der langlebigen Produkte vor, wie Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen<sup>46</sup>.

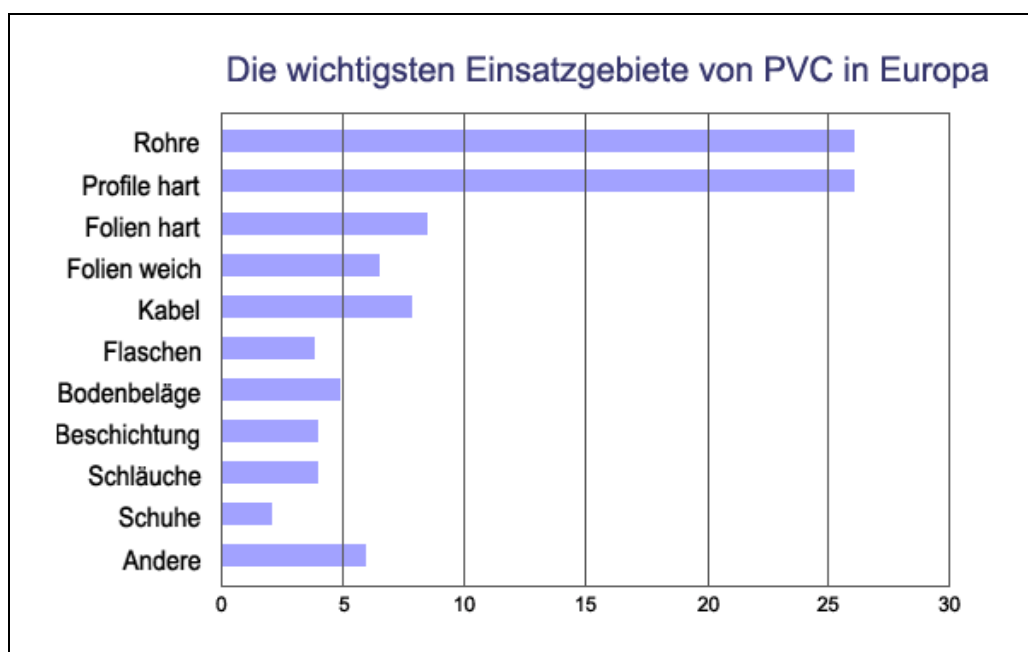


Abbildung 22: Einsatzgebiete von PVC in West-Europa in Prozent<sup>46</sup>

Auch in Österreich werden ca. 60 % des verwendeten (über 80 % des verarbeiteten PVC) als Hart PVC langlebig im Baubereich eingesetzt (Abbildung 23).

<sup>46</sup> AgPU, API, PVCH, VKE; Abbildung nach Daten aus „PVC daten, fakten, perspektiven“; aktualisierte Fassung; Mai 2003

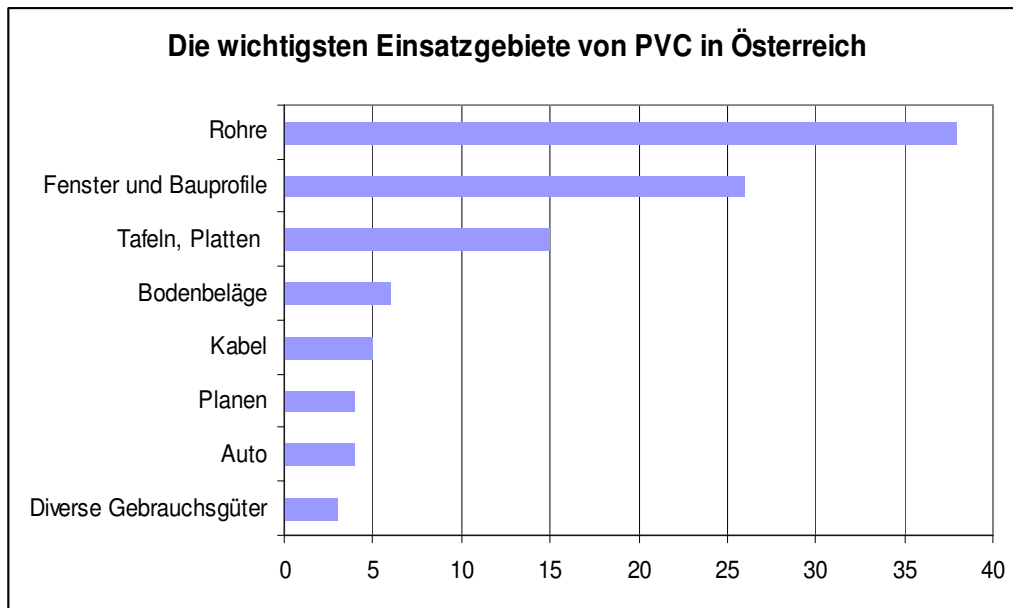


Abbildung 23: Einsatzgebiete von PVC in Österreich in Prozent<sup>46</sup>

#### **Fazit: +**

Bei den Anwendungsbereichen von Hart-PVC Produkten liegt eine Dominanz der langlebigen Anwendungsbereiche vor allem im Bausektor vor. Dies ermöglicht die zielgerichtete Sammlung von Hart-PVC Abfällen, die bei Austausch von Materialien und im Zuge des Abrisses von Gebäuden anfallen.

## **4.2 Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Stabilisatoren**

Grundsätzlich werden bei Hart-PVC-Produkten während der Nutzung keine Stabilisatoren freigesetzt, da diese fest in die Kunststoffmatrix eingebettet sind<sup>43</sup>. Dies wäre nur bei erhöhten Temperaturen möglich, wenn die Matrix erweicht, wodurch Stabilisatoren in erhöhtem Ausmaß freigesetzt werden können. Dies tritt bei sachgemäßer Anwendung aber nicht auf.

#### **Fazit: 0**

Eine Freisetzung von Stabilisatoren während der sachgemäßen Anwendung liegt wegen der Einbindung in die Matrix bei Hart-PVC nicht vor.

### **4.3 Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Farbpigmente**

Analog zu Stabilisatoren werden während der Nutzung auch keine Farbstoffe freigesetzt, da diese fest in die Kunststoffmatrix eingebettet sind. In den in Österreich wesentlichen Produktbereichen (Rohre, Fenster) werden keine bleihaltigen Pigmente mehr eingesetzt. EU-weit ist der Ausstieg aus Blei bis 2015 vorgesehen, maßgebliche Hersteller haben diesen aber bereits vollzogen.

Bei Fensterprofilen erfolgt in Österreich die Farbgebung durch Folien oder Deckschalen aus Aluminium.

Damit können bleihaltige Hart-PVC Produkte fast nur über Importe nach Österreich kommen, diese sind bei Hart-PVC Produkten aber nur gering.

#### **Fazit: 0**

Es werden kaum mehr blei- und chromhaltige Pigmente eingesetzt, könnten aber über Produktimporte auf den Markt kommen. Der Importanteil von Hart-PVC Produkten nach Österreich ist aber nur gering. In der Nutzungsphase würde dies durch die feste Einbindung in die Kunststoffmatrix aber trotzdem keine Belastung durch den Austritt dieser Schwermetalle verursachen.

### **4.4 Kostenvorteil PVC**

PVC kann im Vergleich zu anderen Kunststoffen durch den Rohstoff Salz einerseits, aber auch durch die Verwertung aller bei der Elektrolyse entstehenden Produkte kostengünstig hergestellt werden. Dieser Kostenvorteil wird auch beim Konsumenten als Preisvorteil sichtbar. Die niedrigeren Kosten sind auch ein häufiges Argument der Beschaffer und der Industrie für den Einsatz von PVC.

#### **Fazit: +**

PVC besitzt in vielen Bereichen einen Kostenvorteil gegenüber Konkurrenzprodukten. Die niedrigeren Kosten sind auch ein häufiges Argument für den Einsatz von PVC.

### **4.5 Technische Eignung der Produkte**

PVC verfügt unter allen Thermoplasten über das breiteste Anwendungsspektrum, was durch eine Vielzahl von anwendungsspezifischen Compounds mit unterschiedlichen Additiven ermöglicht wird.

Die technische Eignung von PVC ist bei den einzelnen Anwendungsbereichen generell sehr hoch, in vielen Bereichen weisen PVC-Produkte Vorteile gegenüber Konkurrenzprodukten auf. Die Einschätzung der Eignung ist allerdings sehr kontroversiell, sodass diesbezüglich keine einheitliche Sichtweise vorliegt. Allgemein kann aber gesagt werden, dass PVC-Produkte sich durch geringen Pflegeaufwand und lange Nutzungsdauer auszeichnen, was in einzelnen Fällen auch zu ökobilanziellen Vorteilen führt.

Ein kurzer Einblick in die technischen Vorteile von PVC gegenüber anderen Werkstoffen wird in nachfolgenden Zitaten angegeben:

- Das Fraunhofer Institut stellt in seiner Technologiestudie fest, dass PVC in vielen Fällen eine optimale Lösung darstellt: „Diesen Umfang von Spannweiten der Werkstoffeigenschaften, anwendbaren Verarbeitungs- und Nachbearbeitungsverfahren weist praktisch kein anderer thermoplastischer Werkstoff auf. Der Wunsch, PVC durch andere Werkstoffe zu substituieren, führte in vielen Fällen aus technologischer Sicht zu suboptimalen Lösungen“<sup>47</sup>.
- Weiters bestätigt auch Patrick Moore – einer der Gründer von Greenpeace – die Eignung von PVC: „Further, PVC is durable, low-maintenance, recyclable and performs well on LVA tests“<sup>48</sup>.
- Auch die Enquete-Kommission stellt bereits 1994 fest: „kann die Enquete-Kommission jedoch die Substitution von PVC durch andere Werkstoffe nicht empfehlen. Eine solche Umstellung birgt die Gefahr einer Problemverschiebung, wenn nicht gar einer Verschlechterung des gegenwärtigen Zustandes in sich“<sup>49</sup>.

#### **Fazit: +**

PVC bietet in der technischen Eignung in vielen Anwendungsbereichen Vorteile gegenüber den Konkurrenzprodukten, die auch in Ökobilanzen zu Vorteilen in den einzelnen Anwendungsbereichen führen.

## **4.6 PVC im Brandfall**

Bei jedem Brand entstehen hohe Temperaturen und je nach Brandbedingungen und den am Brand beteiligten Materialien Schadstoffe. Beispiele sind Kohlenmonoxid (CO), Ruß, Salzsäure (HCl) oder Blausäure (HCN). Die meisten Schadstoffe sind gasförmig und werden mit dem Brandgas von der Brandstelle ausgetragen<sup>50</sup>.

Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte des Brandfalls von PVC-Produkten betrachtet.

### **4.6.1 Brandrisiko**

Fast alle Kunststoffe sind brennbar, das muss besonders beim Einsatz im Hochbau und in einigen Tiefbaubereichen (U-Bahn, Tunnelbau) berücksichtigt werden.

Aufgrund des hohen Chlorgehalts ist PVC schwer entflammbar, im Gegensatz zu anderen technischen Kunststoffen, die für das Erreichen dieser Eigenschaft Zusätze von

<sup>47</sup> Fraunhofer ICT; Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid, S.37; 2005

<sup>48</sup> Patrick Moore; Interview mit auf ABC Radio Nationa; Originalinterview: [www.abc.net.au/rn/counterpoint/](http://www.abc.net.au/rn/counterpoint/) und <http://www.youtube.com/watch?v=n6M-ci4FQss;> Australien 2004

<sup>49</sup> Enquête-Kommission; Bericht Schutz des Menschen und der Umwelt -Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft; 1994

<sup>50</sup> Bayrisches Landesamt für Umweltschutz; Schadstoffe bei Brandereignissen; 2004

Flammhemmern benötigen. Der Chlorgehalt von 57 % in PVC bewirkt einen inhärenten Flamschutz des Kunststoffs, dadurch besitzt PVC mit 330 ° bis 400 °C eine höhere Entzündungstemperatur als die meisten anderen Kunststoffe. Generell ist durch die Verwendung von PVC damit kein höheres Brandrisiko gegeben.

### Zünd - Temperaturen

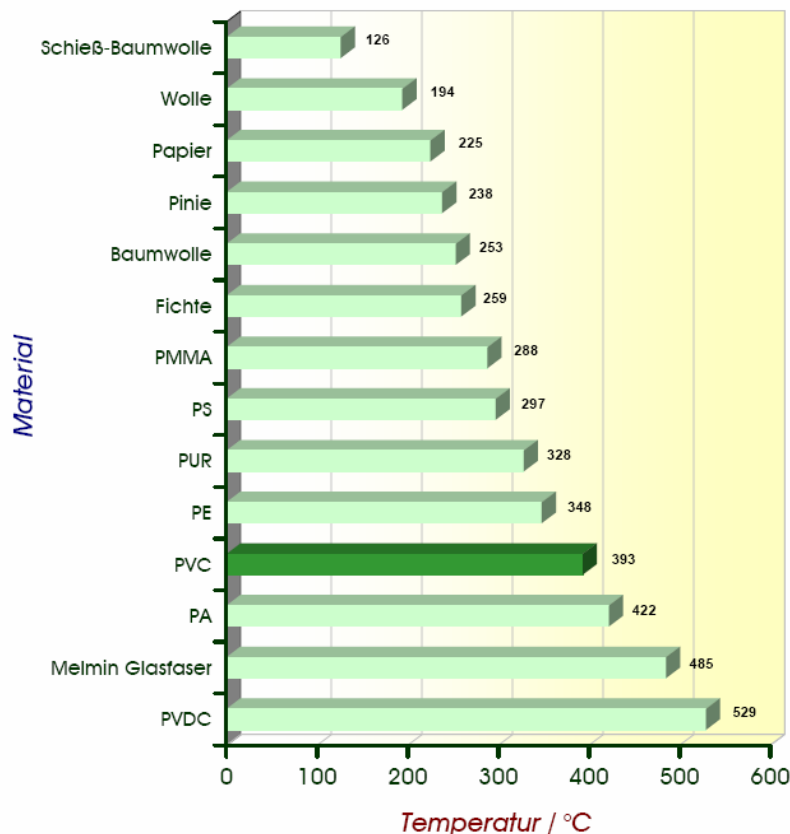


Abbildung 24: Zündtemperaturen im Vergleich<sup>51</sup>,

Gegenüber Stahl wirkt sich bei Kunststoffen, wie auch bei Holz die geringe Wärmeleitung günstig aus<sup>52</sup>. Weiters entwickelt PVC im Brandfall weniger Hitze und es bilden sich keine brennenden Tropfen. Darüber hinaus ist PVC selbstverlöschend, wenn die äußere Brandquelle entfernt wird.

#### 4.6.1.1 Brandrisiko im Baubereich

Als Baustoffe im Sinne der Norm gelten platten- und bahnenförmige Materialien, Verbundwerkstoffe, Bekleidungen, Dämmstoffe, Beschichtungen, Rohre und Formteile. Nach der DIN 4102 - in dieser Norm ist das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen geregelt - werden Baustoffe in die nicht brennbare Baustoffklasse A und in jene der brennbaren Baustoffe B eingeteilt. Die Klasse B gliedert sich in

- schwer entflammbar (B1) sind grundsätzlich brennbar, sie dürfen nach dem Erlöschen des Feuers aber nicht selbständig weiter brennen.
- normal entflammbar (B2) lassen sich durch Zündquellen entflammen und brennen - abhängig von den Umgebungsbedingungen - von alleine weiter.

<sup>51</sup> Hirschle, J., *Journal of Sciences* 5, 289 ;1987

<sup>52</sup> Schießl P; *Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde; Technische Universität München*

- leicht entflammbare (B3) brennen B3-Baustoffe rasant ab. Sie lassen sich mit kleinen Zündquellen entflammen und brennen ohne weitere Wärmezufuhr mit steigender Geschwindigkeit weiter. Sie stellen ein hohes Brandrisiko dar.

In die Baustoffklasse B1 fallen Rohre und Formstücke aus PVC-U-DIN 19531 und PVC-C nach DIN 19538 mit jeweils einer Wanddicke kleiner gleich 3,2 mm.

B2-Baustoffe lassen sich durch Zündquellen entflammen und brennen - abhängig von den Umgebungsbedingungen - von alleine weiter. Dazu gehören Rohre und Formstücke aus PVC-U nach DIN 8061<sup>53</sup>.

Baustoffklasse	Bauaufsichtliche Benennung
A A1 A2	nicht brennbare Baustoffe
B B1 B2 B3	brennbare Baustoffe schwer entflammbare Baustoffe normal entflammbare Baustoffe leicht entflammbare Baustoffe

Tabelle 5: Baustoffklassen gemäß DIN 4102-1

#### **Fazit: +**

PVC hat durch seinen Chlorgehalt einen inhärenten Flammenschutz und damit ein geringeres Brandrisiko als andere Kunststoffe, Holz oder Papier. Hart-PVC hat auch kein Brand förderndes Verhalten, es tropft auch nicht ab. Dadurch kann in den meisten Anwendungsbereichen auf Flammenschutzmittel verzichtet werden. Durch geeignete Füllstoffe kann PVC auch rauch- und chlorarm im Rauch eingestellt werden (Low Smoke, Low Halogen „LSLH“).

#### **4.6.2 Brandverhalten und Folgekosten im Brandfall**

Polyvinylchlorid ist zwar schwer entflammbar, brennt aber in der Flamme unter Freisetzung von Chlorwasserstoff, der mit Wasser verdünnte Salzsäure bildet. Die potenziellen Schäden durch die Salzsäurebildung hängen von der Art des Brandes ab, sie können z.B. bei Bränden in elektrischen Anlagen bedeutend sein. Bei Großbränden hingegen sind bleibende Schäden an Gebäuden weniger durch diese korrosiven Effekte bedingt. Hier dominieren die Zerstörungen durch die hohen Brandtemperaturen bei einem Gebäudebrand, verursacht z.B. durch Holz, Textilien, etc.<sup>54</sup>.

Bei Stahlbetonkonstruktionen haben Brandgase in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die weitere Nutzungsfähigkeit der Bauteile. Die gebildeten Chlorwasserstoffdämpfe können aber an Stahloberflächen zu Korrosion führen. Die Stahlbewehrung im Beton wird in den meisten Fällen jedoch nicht angegriffen, da die Zahl der Chloridionen nicht

<sup>53</sup> Schmacher L.; pw-Internet Solutions GmbH: Die Baustoffklassen; Mönchengladbach; [http://www.baumarkt.de/b\\_markt/fr\\_info/brandbau1.htm](http://www.baumarkt.de/b_markt/fr_info/brandbau1.htm)

<sup>54</sup> Rotard W.; Gefahrstoffe nach Bränden – Sanierungsleitwerte in Sanierung von Brandschäden; Vortragsband einer Fachtagung des VdS e.V.; Köln; 1996

ausreicht. Unbewehrter Beton wird durch die Einwirkung von Salzsäuredämpfen aus PVC-Bränden nicht geschädigt<sup>55</sup>.

Im Allgemeinen gibt es bei einer Sanierung und Brandschadenbeseitigung nach dem heutigen Stand der Technik auch keine Probleme mit Maschinen und elektronischen Einrichtungen<sup>56</sup>. Die direkten Kosten für Aufräum- und Sanierungsmaßnahmen sind relativ gut abschätzbar<sup>57</sup> und bei sachgemäßer Sanierung nicht durch den PVC-Einsatz erhöht. Die Möglichkeit einer Korrosion besteht jedoch bei Kleinbränden (Brände mit begrenzten Schäden) ohne Sanierung bzw. vor allem bei nicht sachgemäßer, zu später Durchführung.

Bei Spezialanwendungen kann die höhere Rauchdichte im Brandfall wesentlich sein, dies ist z.B. Untertage, bei Menschenansammlungen und im Tunnelbau zu berücksichtigen.

#### **Fazit: -**

PVC ist zwar schwer entflammbar, brennt aber in der Flamme unter Freisetzung von Chlorwasserstoff und verstärkter Rauchbildung. Bei sachgemäßer Sanierung nach dem heutigen Stand der Technik sind bei Großbränden die PVC-spezifischen Belastungen je nach Gebäudenutzung und verwendete Produkte generell nicht wesentlich bei den Sanierungskosten. In einzelnen Fällen kann die gebildete Salzsäure zu Korrosionsproblemen führen. Die PVC-spezifischen Belastungen durch die Salzsäurebildung und die höhere Rauchdichte können in Spezialfällen (vor allem Untertage oder in Tunneln) bedeutend sein.

### **4.6.3 Personengefährdung im Brandfall**

Bei jedem Brand geht vom entstehenden Kohlenmonoxid (CO) die größte Gefahr (90 %) aus, gefolgt von Blausäure, die bei Brand von Wolle, Teppichböden, Textilien, etc. entsteht. PVC-Brandgase sind für Menschen nicht gefährlicher als Gase anderer Brände, da der Chlorwasserstoff, der beim Verbrennen von PVC entsteht, auf Grund seiner Toxizitätscharakteristik im Normalfall nicht die Todesursache ist.

Untersuchungen von Engelmann und Skura haben gezeigt, dass im Brandfall der Kohlenmonoxidgehalt rasch tödliche Konzentrationen erreicht, wobei die Chlorwasserstoffkonzentration (z. B. im Löschwasser) nur langsam steigt<sup>58</sup>. Die Entstehung von Dioxinen ist nicht an die Anwesenheit von PVC gebunden (siehe Kapitel 4.6.4), sie sind auch nicht der wesentliche Faktor für die Personengefährdung. Übereinstimmend damit konnten im Blut von Feuerwehrleuten bislang keine erhöhten Dioxinwerte festgestellt werden.

<sup>55</sup> [http://www.biw.fhd.edu/alumni/2002/stiebinger/sem-brandschutz/bv\\_beton.htm](http://www.biw.fhd.edu/alumni/2002/stiebinger/sem-brandschutz/bv_beton.htm); Brandverhalten von Beton

<sup>56</sup> Hammer; Sanierung von Brandschäden; Vortrag auf der VdS Fachtagung, Köln 1996

<sup>57</sup> Verband der Schadensversicherer VdS; Richtlinie zur Brandschadensanierung; VdS-Richtlinie 2357; 1998

<sup>58</sup> Engelmann M., Skura J.; PVC im Brandfall; Gummi, Fasern, Kunststoffe, Nr.49; 1996

**Fazit: 0**

Die wesentliche Personengefährdung geht bei Bränden von Kohlenmonoxid (CO) aus. Die aus PVC gebildeten Verbrennungsprodukte haben nur geringere Bedeutung. Auch die Dioxinbildung ist nicht primär für die Gefährdung von Menschenleben verantwortlich.

**4.6.4 Bildung von persistenten toxischen Substanzen bei Bränden**

Die Gruppe der persistenten organischen Schadstoffe (POPs) ist eine Sammelbezeichnung für Substanzen mit den umgangssprachlichen Trivialnamen Dioxine (Dibenzo-p-Dioxine) und Furane (Dibenzo-p-Furane). Sie entstehen vor allem unerwünscht bei Verbrennungsprozessen, an denen organische oder anorganische chlorhaltige Verbindungen beteiligt sind bei Temperaturen zwischen 300 und 600 °C; bei Temperaturen ab etwa 850 °C zerfallen sie. Mit Rauchgasen, Produkten und Produktionsrückständen gelangen sie in die Umwelt. Sie entstehen ebenso durch offene Feuer, Wald- und Deponiebrände, Brände von und in Gebäude, Brandrodung und Gewitter. Für die Gesamtbilanz von Österreich sind Brände jedoch eine relativ unbedeutende Quelle.

Die mengenmäßig größten Emissionen an Dioxinen und Furanen werden durch den Hausbrand, die Sinteranlagen, die Sekundär-Aluminiumerzeugung, die Gewinnung und Produktion von Eisen und Stahl und jene Branchen, die Holz und Holzreststoffe thermisch verwerten, verursacht. Branchen, die aufgrund der verwendeten Verfahren, der Einsatzstoffe sowie der Betriebsbedingungen Anlagen mit hohem Dioxinemissionspotenzial betreiben, spielen – bedingt durch die in den letzten Jahren gesetzten Minderungsmaßnahmen – für die Gesamtemission nur noch eine untergeordnete Rolle. Dazu gehören z. B. die Müllverbrennungsanlagen und mit einigen Einschränkungen die Sekundär-Kupferproduktion<sup>59</sup>. Die Chlorchemie ist derzeit nur noch in geringem Maß an Neueinträgen von Dioxin in die Umwelt beteiligt, gilt aber als wichtiger Verursacher von Altlasten.

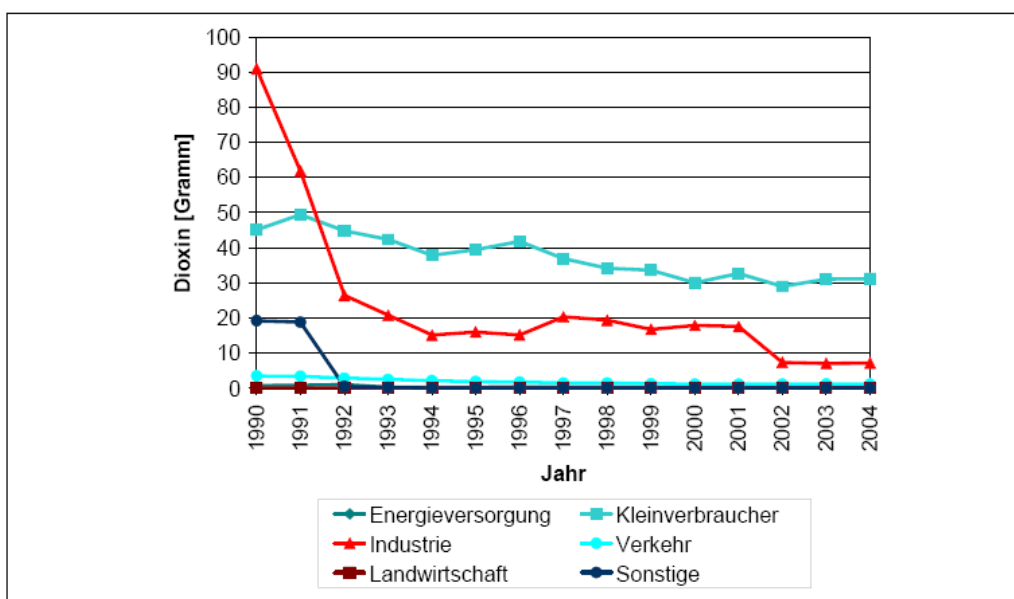


Abbildung 25: Trend der Dioxinemissionen nach Sektoren von 1990 bis 2004<sup>59</sup>

<sup>59</sup> Umweltbundesamt Österreich; Emissions-Trends in Österreich; 2005



Es gibt 210 mögliche Verbindungen, von denen weniger als 20 für den Nachweis im menschlichen Organismus toxikologisch von Bedeutung sind. Die weltweite, ubiquitäre Umweltbelastung wird angesichts der langen Halbwertszeit auch dann, wenn die Emission erheblich eingeschränkt werden kann, in den kommenden Jahren nur langsam zurückgehen<sup>60</sup>. Aus umweltmedizinischer Sicht ist die Anreicherung über die Nahrungskette, besonders in Milch, Fleisch, Eiern und Fischen sowie daraus hergestellten Produkten von größter Bedeutung<sup>61</sup>.

Betreffend die Personengefährdung bei Bränden überwiegt im Brandrauch die Gefährlichkeit von Kohlenmonoxid, Blausäure und Salzsäure. Auf der erkalteten Brandstelle hingegen stehen neben Ruß, der selbst bereits ein Gesundheitsrisiko darstellt, besonders die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs), Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Dioxine im Vordergrund. Die entstehenden persistenten Stoffe sind fest an den Brandruß gebunden und weisen nur geringe Mobilität auf. Auch wenn von einem Risiko der Dioxinaufnahme durch Inhalation von Ruß ausgegangen werden muss, konnten bislang auch bei Feuerwehrleuten, der bei Bränden am stärksten exponierten Gruppe, keine erhöhten Dioxinwerte im Blut von Feuerwehrleuten nachgewiesen werden<sup>62,63</sup>.

Die festgestellten Dioxin-/ Furangehalte im Ruß bei Bränden in Wohngebäuden lagen unter 200 Nanogramm TE pro Quadratmeter (TE = Toxizitätsäquivalente: Sie geben an, wie stark ein bestimmtes Dioxin- oder Furankongener im Vergleich zu 2,3,7,8-TCDD wirkt.). Bei Gebäuden mit besonders hohem Kunststoffanteil (z.B. Arztpraxen, Lager etc.) traten aber Gehalte bis zu 10.000 Nanogramm TE auf<sup>64</sup>.

Das kanzerogene Potenzial des Brandrußes wird vor allem durch die, ebenfalls an den Ruß gebundenen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs) bestimmt. Deren Wirkung kann, auch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen toxikologischen Wirkung, um etwa den Faktor 100 bis 500 höher als die von Dioxinen/Furanen sein. Da Ruß aus Brandstellen durch eine Vielzahl toxischer Verbindungen unabhängig von der Anwesenheit von PVC belastet ist, ist jedenfalls eine sorgfältige, dem Stand der Technik entsprechende Entsorgung notwendig.

### **Fazit: 0**

Organische und anorganische Chlorverbindungen führen bei Bränden zu erhöhter Dioxin- und Furanbildung, diese sind österreichweit aber eine nur unbedeutende Dioxinquelle. Die Personengefährdung bei Bränden ist durch die Rauchgase, bei denen Kohlenmonoxid dominiert, geprägt. Die bei Bränden gebildeten Dioxine/Furane sind an den Ruß gebunden und weisen nur geringe Mobilität auf. Im Ruß wird das Gefährdungspotenzial neben Dioxinen/Furanen vor allem durch polyzyklische Aromate (PAKs) verursacht, die eine spezielle Entsorgung nach Bränden auch ohne PVC-Beteiligung erfordern.

<sup>60</sup> Deutsches Gesundheitsamt; [://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/chemie/luft/diox/infobl.htm](http://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/chemie/luft/diox/infobl.htm)

<sup>61</sup> Arbeitsgruppe Dioxin; <http://www.hygiene.ruhr-uni-bochum.de/hygiene/dioxin/dioxin-information.html>; 2007

<sup>62</sup> Ruhr-Universität Bochum und Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen; Umweltmedizinische Untersuchungen an Feuerwehrleuten; 1993

<sup>63</sup> Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen; Dokumentation Grossbrand Lengerich; 1994

<sup>64</sup> Fachinformation Umwelt und Gesundheit; Polyvinylchlorid (PVC); Stand: April 2000

## 5 PVC-Produkte im und als Abfall

### Schwerpunkt zur Situation in Österreich

In diesem Kapitel wird die aktuelle Situation von PVC im Abfall in Österreich betrachtet, aber auch die Möglichkeiten der Rückgewinnung unter Einbeziehung internationaler Aktivitäten.

#### 5.1 Die aktuelle Abfallsituation bei PVC

Wie Kapitel 4 zeigt, geht der größte Teil der eingesetzten Hart-PVC Produkte in den Baubereich und erfüllt dort seine Aufgaben für meist viele Jahrzehnte. Nachdem der massive Einsatz von PVC im Baubereich vor mehr als 30 Jahren begonnen hat, wird erst in den nächsten Jahren mit wachsenden PVC-Abfallmengen aus dem Baubereich gerechnet. Derzeit finden sich im Abfall daher vor allem die kurzlebigen Produkte, die vielfach aus Weich-PVC bestehen.

In Österreich betrug die Summe aller PVC-Abfälle im Jahr 2000 ca. 43.000 Tonnen<sup>42</sup>. Davon waren etwa 34.000 Tonnen Gebrauchsabfälle wovon nur ca. 1.000 - 3.000 Tonnen (2,9 %-8,8 %), meist Hart-PVC Produkte, dem Recycling zugeführt wurden. Thermisch genutzt wurden ca. 4.000 bis 6.000 Tonnen, der Rest wurde deponiert. Seit In-Kraft-Treten der Deponie-VO ist mit einer deutlichen Erhöhung der Mengen in die Verbrennung zu rechnen (siehe 5.2.2). Wenn auch die Zahlen nicht mehr den aktuellen Stand wiedergeben dürften, so stimmen doch die Angaben zu den Verwertungsmengen tendenziell mit den Branchenangaben überein.

PVC Abfall in Österreich 2000 in t	
PVC Abfall gesamt	43.000
Gebrauchsgegenstände	34.000
recykliert	1.000 - 3.000
thermisch genutzt	4.000 - 6.000
deponiert	34.000 - 38.000

Tabelle 6: PVC Abfall in Österreich<sup>42</sup>

Eine aktuelle Abschätzung der PVC-Abfallströme durch die GUA (pers. Mitteilung, noch unveröffentlicht) führt zu insgesamt 35.000 t PVC-Abfall, von denen etwa 76 % vorwiegend thermisch in MVAs verwertet werden, 16 % gehen in mechanisch-biologische Behandlungsanlagen (MBAs) und etwa 8 % werden werkstofflich verwertet. Letzteres betrifft vor allem Rohre, Fensterrahmen, Kabel, Bodenbeläge und Dachfolien.

Die geringen Mengen, die bei den eingerichteten Sammelsystemen für Fenster und Rohre im Vergleich zur Produktion eingehen, dürften mit dem Verbleib der Produkte in den Bauwerken zusammenhängen. Laut API Wien<sup>65</sup> wirken sich die hohe Nachfrage vor allem nach langlebigen PVC-Anwendungen und die steigenden Rohstoffpreise negativ auf die Verfügbarkeit von PVC-Abfällen zur Erfassung und Verwertung aus.

Die vorliegenden Erfahrungen bei Verwertern bestätigen das Recycling von PVC als eine Perspektive für die Zukunft, die auch zu einer optimalen Stoffwirtschaft und Ressourcennutzung führen würde. Während die Technologien zur Wiederverwertung von PVC ständig verbessert werden, mangelt es an der Verfügbarkeit von Altmaterial,

<sup>65</sup> API; [http://www.pvc.at/d/news\\_eu\\_0505.htm](http://www.pvc.at/d/news_eu_0505.htm) ; 2005

nicht zuletzt aufgrund der steigenden neuerlichen Verwendung alter Baumaterialien - etwa durch den Wiedereinbau gebrauchter Kunststoff-Fenster. Für die Zukunft werden aber steigende Mengen erwartet, da Sanierungen und Tauschmaßnahmen im Steigen begriffen sind. Daher sollten zukünftig bei den Sammelstellen ausreichende Mengen für das stoffliche Recycling verfügbar sein. Auch EU-weit wird erwartet, dass der Anfall auf 6,2 Mio t pro Jahr bis 2020 ansteigen wird<sup>66</sup> (Tabelle 7).

Angaben in t	2000	2010	2020
<b>Prä-User</b>	500.000	650.000	920.000
<b>Post-User</b>	3.600.000	4.700.000	6.200.000

Tabelle 7: Entwicklung des PVC-Abfallaufkommens in Europa<sup>67</sup>

### **Fazit: 0**

Der Großteil der in den Baubereich gehenden langlebigen PVC-Produkte ist noch in Verwendung und fällt damit noch nicht als Abfall an. Die derzeit im Abfall vorliegenden PVC-Mengen dürften vorwiegend aus kurzlebigen Weich-PVC-Anwendungen stammen. Sammelsysteme sind vor allem für langlebige Produktbereiche seit längerem etabliert, die gesammelten Hart-PVC Mengen sind wegen der Langlebigkeit der Produkte aber noch gering.

Bei zukünftig steigenden Abfallmengen kann bei ausreichenden Sammelsystemen in Zukunft vor allem bei Hart-PVC-Produkten mit deutlich steigendem Altmaterialeinsatz in der Produktion gerechnet werden, was die Stoffwirtschaft von PVC deutlich verbessern würde.

## **5.2 Umweltbelastungen durch PVC im Abfall**

In den nachfolgenden Kapiteln werden die möglichen Belastungen durch PVC-Produkte bei der Abfallbehandlung und -entsorgung behandelt und anschließend die Verwertungswege betrachtet.

### **5.2.1 Umweltbelastungen durch Stabilisatoren und Farbpigmente**

Hart-PVC verhält sich auf **Deponien** über lange Zeit inert, langfristig ist aber ein Austritt von Stabilisatoren durch höhere Temperatur, Angriff durch Mikroorganismen oder chemische Vorgänge auch bei Hart-PVC nicht ganz auszuschließen.

Schwermetallstabilisatoren könnten damit in das Sickerwasser gelangen. Da Deponien mit einer Sickerwasserbehandlungsanlage ausgestattet sind, ist kein nennenswerter Eintrag in die Umwelt anzunehmen.

In diesem Zusammenhang stellte das deutsche Umweltbundesamt fest, dass „die Gefahr der Elution von Schwermetallen aus PVC-Produkten sehr gering“ ist. PVC-Produkte sind im Vergleich zu anderen Abfallstoffen auf Deponien keine entscheidenden Schwermetallquellen. In dem 2001 veröffentlichten Bericht der TUTech GmbH wird

<sup>66</sup> Oekokauf Wien; <http://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/chlororganisch.pdf>

<sup>67</sup> European Commission; Study for DG XI; Mechanical Recycling of PVC Wastes; Prognos 2000

festgestellt, dass stabilisierte PVC-Produkte auf Deponien keine signifikanten Umweltauswirkungen haben<sup>68</sup>. Dies wird ebenfalls in einer weiteren Studie über Recycling von Alt-PVC bestätigt<sup>69</sup>. Durch die Deponie-VO einerseits, andererseits durch den zunehmenden Wert des Rohstoffes haben die auf Deponie gehenden PVC-Mengen deutlich abgenommen (s.a 5.1).

In **Müllverbrennungsanlagen** können Stabilisatoren und Farbpigmente in die Gasphase übergehen, sie werden dann in der Abluftreinigung, die auch auf die Abscheidung von Schwermetallen ausgerichtet ist, abgeschieden. Das deutsche Umweltbundesamt stellt fest<sup>43</sup> „Auch bei der steigenden Bedeutung der Müllverbrennung für die Hausmüllentsorgung ist daher davon auszugehen, dass die Freisetzung von Cadmium und Blei aus der Verwendung von Pigmenten auch künftig < 1 % der Gesamteinträge in die Gewässer liegen wird“.

### **Fazit: 0**

Die Ablagerung von PVC auf Deponien ist seit In-Kraft-Treten der DeponieVO deutlich zurückgegangen. Durch die Umwelteinrichtungen von Deponien und Müllverbrennungsanlagen liegt keine Belastung der Umwelt durch Stabilisatoren und Pigmente vor.

## **5.2.2 Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen**

Der Chorgehalt im Hausmüll, der sich über Messungen von Verbrennungsanlagen belegen lässt, beträgt europaweit im Mittel ca. 7 kg Cl / t Abfall, wobei etwa die Hälfte nämlich 3,4 bis 5,6 kg Cl / t aus PVC stammt<sup>70</sup>.

Geht man von 1,6 Mio t Haushaltsabfällen in Österreich aus, ergibt dies einen Anteil von 5.400 – 9.000 t Chlor, der auf die Verbrennung von PVC zurückzuführen ist<sup>70</sup>. Daraus ergibt sich eine Gesamtmenge an PVC im Abfall von 12.000 – 20.000 t (inklusive Spitalsabfällen). Diese Abschätzung stimmt tendenziell mit den Werten in<sup>42</sup> überein. Die aktuellen Mengen von PVC im Restmüll dürften vorwiegend Weich-PVC Produkte sein. Sie sind damit vom Mengenanteil nur gering (kleiner 2 %), machen von der Chlorfracht aber etwa die Hälfte aus.

Der bei der Verbrennung gebildete Chlorwasserstoff wird in den Nasswäschern von MVAs, von denen der erste im sauren Bereich und meist mit Salzsäure arbeitet, abgeschieden. Die Gaswäsche ist wegen des im Abfall auch aus anderen Quellen stammenden nie auszuschließenden Chlor- und Fluorgehaltes ein normaler Verfahrensschritt bei MVAs.

Die Verbrennung von PVC war lange Zeit ein sensibles Thema, als sie im Verdacht stand, den Hauptteil der Dioxinbelastungen zu verursachen. Nicht nur bei PVC, sondern bei fast allen Verbrennungsprozessen können gesundheitsschädliche polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) entstehen.

Müllverbrennungsanlagen(MVAs) waren anfänglich maßgebliche Dioxinquellen, seit vielen Jahren sind aber alle MVAs in Österreich mit Filteranlagen ausgerüstet, die in der

<sup>68</sup> TuTech GmbH; *Contribution of Post-Consumer PVC Products to Lead Inventory in Landfilled Waste*; Hamburg; Jun. 2001

<sup>69</sup> Rieber, Boeke, Saffert, Lindner; *Recycling von bleihaltigem Alt-PVC*; 1995

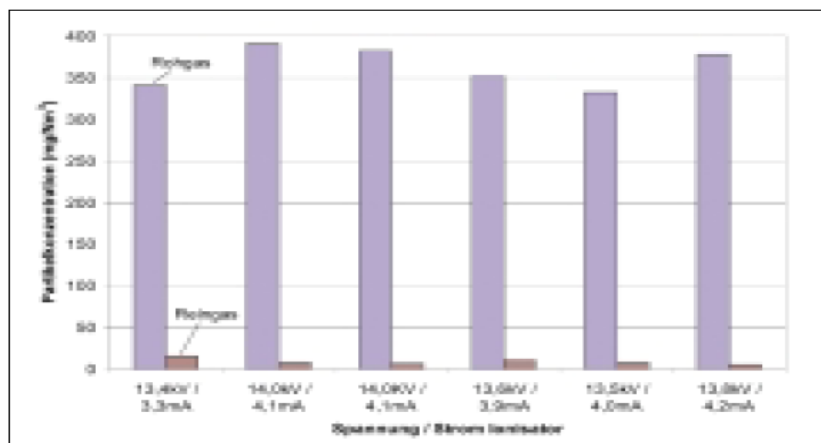
<sup>70</sup> Bertin Technologies, *The influence of PVC on quantity and hazardousness of flue gas residues from incineration*, Study for DG XI, April 2000

Lage sind, Abgaswerte von 0,1 ng Toxizitäts-Äquivalente pro Normkubikmeter (TEQ / Nm<sup>3</sup>) zu erfüllen.

Heute sind alle Abfallverbrennungsanlagen, in denen auch PVC-Abfälle thermisch verwertet werden, mit fortschrittlicher Abgasbehandlung ausgestattet, sodass die entstehenden Schadstoffe abgetrennt werden können. Die in der EU befindlichen Müllverbrennungsanlagen (MVAs) stellen laut Vehlow eine Dioxinsenke dar<sup>71</sup>. Salzsäure und Schwermetalle bedeuten auch in der Verbrennung keine Probleme, wie Messungen am Forschungszentrum Karlsruhe zeigen, wird ein Abscheidungsgrad von 99 % für beide Stoffe erzielt<sup>72</sup>.

### Technische Daten

Quecksilberabscheidung	bis zu 99%
SO <sub>2</sub> - und HCl-Abscheidung	bis zu 99%
Feinstpartikelabscheidung	bis zu 98%
Dioxinabscheidung	bis zu 97%
Differenzdruck	< 8 mbar
Leistungsaufnahme Ionisator	0,2 bis 0,3 W / (m <sup>3</sup> /h)



Messung der Partikelkonzentration im Roh- und Reingas des Kombiwäschers

Abbildung 26: Auszug aus den Messungen des Forschungszentrum Karlsruhe

### Fazit: 0

Die Verbrennung von PVC in Müllverbrennungsanlagen (MVAs) stellt durch deren technologische Ausstattung keine Quelle von Umweltbelastungen dar.

### 5.2.3 Mehrkosten in der Abfallverbrennung durch PVC

<sup>71</sup> Vehlow J.; Waste combustion and the dioxin issue; Korean Institute of Science and Technology (KIST); Europe Environmental Technology Workshop; Saarbrücken 1997

<sup>72</sup> Dr. H.-R. Paur; Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Multifunctional Scrubber for Incineration Plants; Simultaneous Removal of Mercury, Submicron Particles, and Dioxins

Wegen des Chloranteils und des damit geringen Kohlenstoffanteils und niedrigeren Heizwertes ist bei PVC einerseits der Energiegewinn geringer, andererseits entsteht bei der Verbrennung Chlorwasserstoff der in den Wäschern zu Salzsäure reagiert, verwendete Stabilisatoren werden freigesetzt und Dioxine gebildet.

Da unabhängig von PVC ein Halogeneintrag (Chlor oder Fluor) nicht ausgeschlossen werden kann, besteht heute die Verpflichtung, jede MVA mit mehrstufigen Wäschern und Dioxinfilter auszustatten. Die anfallenden Betriebskosten der Abluftreinigung werden nicht maßgeblich durch PVC bestimmt. Die aus dem Chlorwasserstoff im Wäscher entstehende Salzsäure geht ins Waschmedium über und stellt keine zusätzliche Belastung dar.

Die Kosten für Kunststoffe in der Müllverbrennung bewegen sich in einem Bereich von 260 bis 400 Euro pro Tonne. In der im Jahr 2000 veröffentlichten Kirrman-Studie „Incineration of PVC and other products in MSW“ liegt PVC mit 320 Euro pro Tonne Weich-PVC und 340 Euro pro Tonne Hart-PVC im Mittelfeld der untersuchten Materialien<sup>73</sup>. Die häufig unterstellten überdurchschnittlich hohen Kosten für die Verbrennung von PVC-Müll haben sich nicht bestätigt. Es ergeben sich daher keine starken Veränderungen in den Behandlungskosten von Restmüll, falls PVC daraus eliminiert würde.

#### **Fazit: 0**

Bei Müllverbrennungsanlagen entstehen durch den PVC-Anteil im Abfall keine zusätzlichen Kosten. Eine Eliminierung von PVC würde keine großen Veränderungen in der Kostenstruktur bringen.

### **5.3 Altmaterialeinsatz durch Recycling**

Im Vergleich zu anderen Kunststoffen hat PVC einen geringeren Erdölanteil und daher einen geringeren Brennwert. Damit kann nur etwa die Hälfte des PVCs thermisch genutzt werden, der Chloranteil bleibt ungenutzt. Aus diesen Eigenschaften erscheint eine getrennte Sammlung mit nachfolgender stofflicher Verwertung oder thermischer Verwertung unter Rückgewinnung der Salzsäure erstrebenswert.

Möglich ist dabei sowohl werkstoffliches Recycling (Erhalt der PVC-Matrix, Rückgewinnung des Granulats) als auch rohstoffliches Recycling (Rückgewinnung von Kunststoff-Grundbausteinen). Welches Verfahren gewählt wird, hängt zum Großteil vom Reinheitsgrad ab: je reiner der Abfall ist, desto eher wird werkstoffliches Recycling eingesetzt, je verschmutzter bzw. vermischter, desto mehr kommt rohstoffliches Recycling bzw. thermische Verwertung zum Einsatz.

Heute können dank der Fortschritte in der Recyclingtechnologie z. B. bei der Herstellung von Fensterrahmen bereits bis zu 70 % Rezyklat-Anteile durch C-Extrusion eingearbeitet werden (Fensterrahmen mit Rezyklatkern)<sup>74</sup>. Diese positiven Erfahrungen konnten bei der Aufbereitungsanlage der Reststofftechnik in Henndorf in Salzburg bestätigt werden. Sie zeigen, dass sich PVC sehr gut für ein Recycling als Granulat (werkstoffliches Recycling) eignet.

<sup>73</sup> Kirrman; *Incineration of PVC and other products in MSW*; Nov. 2000

Wie Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen, wurden in Deutschland bereits 2003 annähernd 46 % der PVC-Abfälle verwertet. Bezogen auf den Gesamtabfallstrom werden ca. 33 % werkstofflich, 10 % energetisch (mit MVA zur Verwertung) und 2 % rohstofflich verwertet. Cirka 55 % der Abfälle werden deponiert oder verbrannt (in Müllverbrennungsanlagen)<sup>74</sup>.

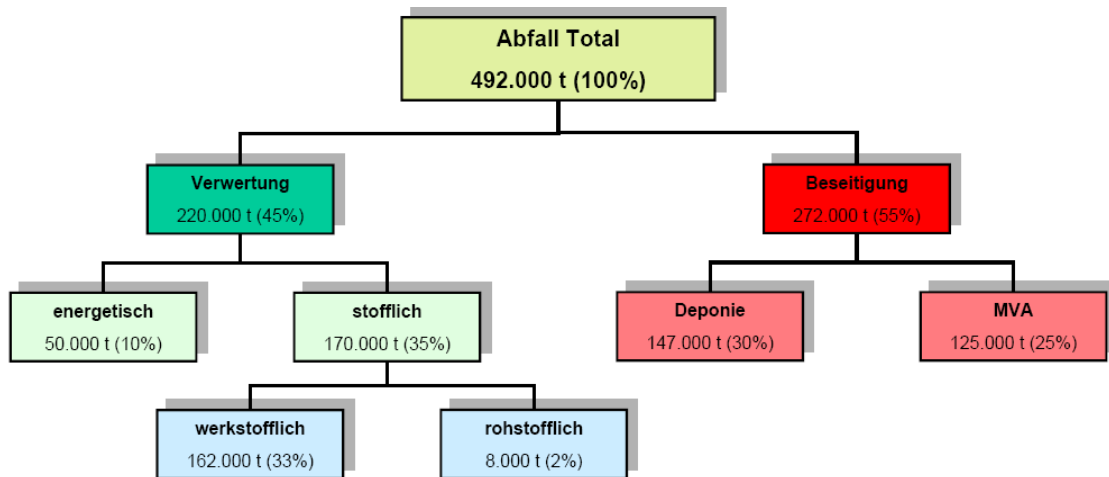


Abbildung 27: Abfallbilanz für PVC für Deutschland 2003<sup>74</sup>

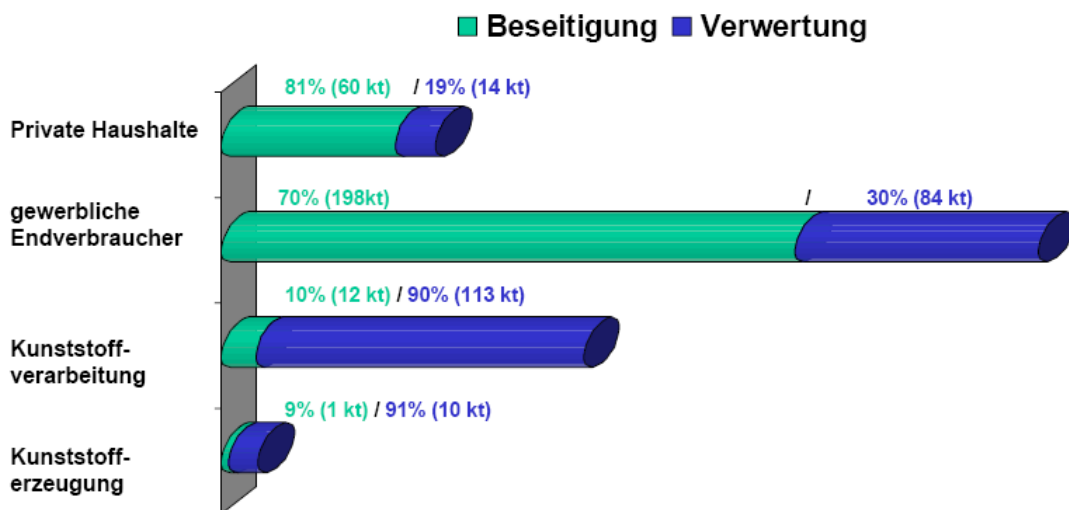


Abbildung 28: Verwertungsanteil nach Herkunft in Deutschland 2003, Qu: AGPU

Der Großteil der PVC-Abfälle kommt aus dem post-consumer Bereich (Abbildung 28). Im Produktions- und Verarbeitungsbereich liegt heute bereits weitgehend vollständiges Recycling vor, aber auch im Gewerbeabfall zeigt sich mit 30 % ein hoher Verwertungsanteil.

<sup>74</sup> AGPU; Consultic-Studie: Produktions-, Verbrauchs- und Abfalldaten für PVC in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung; 2005

**Fazit: >**

Wegen des mineralischen Anteils und der damit geringeren thermischen Nutzungsmöglichkeit sollte stoffliches Recycling im Vordergrund stehen, bei dem sowohl der fossile als auch der mineralische Teil genutzt wird. Derzeit wird wegen der geringen Altmaterialmengen aber noch überwiegend Frischmaterial für Hart-PVC Produkte eingesetzt.

Technologien für werkstoffliches Recycling bestehen und haben ihre Funktionsfähigkeit erwiesen. Notwendige getrennte Sammelsysteme liegen für Hart-PVC-Produkte bereits vor und werden bei zukünftig steigenden Abfallmengen aus dem Baubereich zu einer deutlichen Steigerung des Einsatzes von Altmaterial beitragen. Die Sammel- und Verwertungssysteme werden in den einzelnen Produktbereichen auf die ausreichende Kapazität für die steigenden Mengen vorbereitet. Durch den Ausstieg aus dem Blei-Einsatz (und schon länger aus der Cadmium-Anwendung) wurde ein wertvoller Beitrag zur Vermeidung problematischer Schwermetalle getätigt. Die Abtrennung der in Altprodukten in Umlauf befindlichen Blei- und Cadmiumverbindungen im Zuge von Rezyklierungsanlagen wird eine zukünftige Herausforderung im Sinne optimalen Stoffstrommanagements.

**5.3.1 Situation bei PVC-Fenstern**

In Österreich hat der ÖAKF ein Sammel- und Verwertungssystem für Kunststofffenster initiiert, das allen Marktteilnehmern in gleicher Weise zur Verfügung steht. Die teilnehmenden Betriebe haben sich einer Selbstverpflichtung unterworfen, alle Altkunststofffenster in dieses System einzubringen. Im Jahr 2004 wurden ca. 31.000 Stück gesammelt. Von den 2004 in Österreich ausgebauten Alt-Kunststoff-Fenstern kamen etwa 16 % zum stofflichen Recycling<sup>75</sup>.

Auf die Verwertung von Altfenstern spezialisiert ist die Salzburger Firma Reststoff-Technik, die für Logistik und Vorverarbeitung der Altfenster sorgt. Glas und Metall werden lokal verwertet, das gewonnene Alt-PVC gelangt zur Aufbereitung an VEKA Umwelttechnik in Thüringen. Der wirtschaftliche Erfolg der Reststoff-Technik führte zum Aufbau einer eigenen Verarbeitungsanlage in Österreich. Seit Anfang 2006 betreibt die Firma Reststofftechnik eine eigene Recyclinganlage für Hart-PVC in Henndorf, Salzburg, wo der eingebrachte Kunststoff automatisch getrennt und gemahlen wird und danach wieder der Profil-Extrusion zur Verfügung steht. Die Anlage hat eine Kapazität von 10.000t pro Jahr. Die Kosten der Verwertung für den Bauherren betragen zwischen € 0,- (bei Fenstern ohne Glas), bis € 70,- (bei Fenstern mit Glas) bei Anlieferung zum Recyclingwerk Henndorf, bei einer Übernahme an der Baustelle sind Transportkosten von ca. € 250 - 300 / pro 5t Container zu berücksichtigen.

**5.3.2 Situation bei PVC-Rohren**

Ähnlich wie in den anderen Bereichen haben sich die europäischen Hersteller von Kunststoffrohren und -formstücken verpflichtet, bis zum Jahr 2005 mindestens 50 % der gesammelten Abfälle aus Rohren und Formstücken zu verwerten. Seit 1994 besteht ein

<sup>75</sup> GUA; „Altfenster aus PVC – Mengenerhebung“; 2005



für Handel und Kunden kostenloses Sammelsystem. Die Rohrabfälle werden sortiert, gereinigt und zerkleinert. Die zerkleinerten Kunststoffteile werden in der Kunststoffindustrie wieder eingesetzt. Der 1991 gegründete Österreichische Arbeitskreis Kunststoffrohr Recycling (ÖAKR) hat in Österreich ein flächendeckendes Sammelsystem für gebrauchte Kunststoffrohre, Formstücke und Verarbeitungsreste aufgebaut. Die Sammelmenge konnte von 1991 mit 53 t auf 706 t im Jahr 2006 gesteigert werden. Die Altstoffe werden einer stofflichen Verwertung zugeführt, die gebrauchten Rohre dabei vermahlen und gemeinsam mit Neumaterial wieder verarbeitet. Zwischen 1991 und 2006 hat der ÖAKR insgesamt 6.800t Kunststoffrohre gesammelt und verwertet.

### 5.3.3 Das Vinyloop Verfahren für PVC-Verbunde

Eine für die Verwertung vorteilhafte Eigenschaft von PVC ist dessen vollständige Löslichkeit in bestimmten Lösungsmitteln. Von Solvay S.A. wurde ein mechanisches Recyclingverfahren namens VINYLOOP entwickelt:

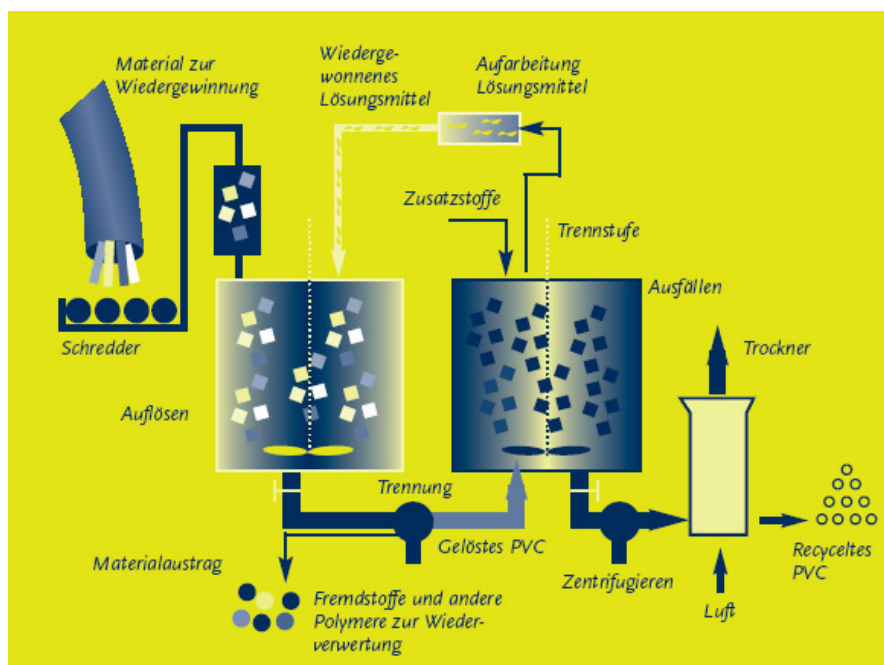


Abbildung 29: Das VINYLOOP-Verfahren

In einem vollständig rezyklierbaren Lösungsmittel werden PVC-Verbunde aufgelöst und nach Entfernung der Fremdstoffe wieder ausgefällt und getrocknet. Wasser und Lösungsmittel werden dem Kreislaufsystem wieder zugeführt. Das gewonnene PVC-Compound kann wieder in der Produktion eingesetzt werden. Eingesetzt wird das Verfahren beispielsweise für Planen (PVC/Polyester) und Kabel (PVC/Kupfer).

Gegenüber anderen Entsorgungswegen und gegenüber frischem Compound hat das Vinyloop-Verfahren deutliche Vorteile. Durch das einfache Verfahren (Auflösen und Ausfällen) ist im Vinyloop-Verfahren geringerer Energieeinsatz als bei konkurrierenden chemischen Recycling-Technologien erforderlich. Auch die Abgabekosten sind gegenüber den anderen Verfahren geringer.

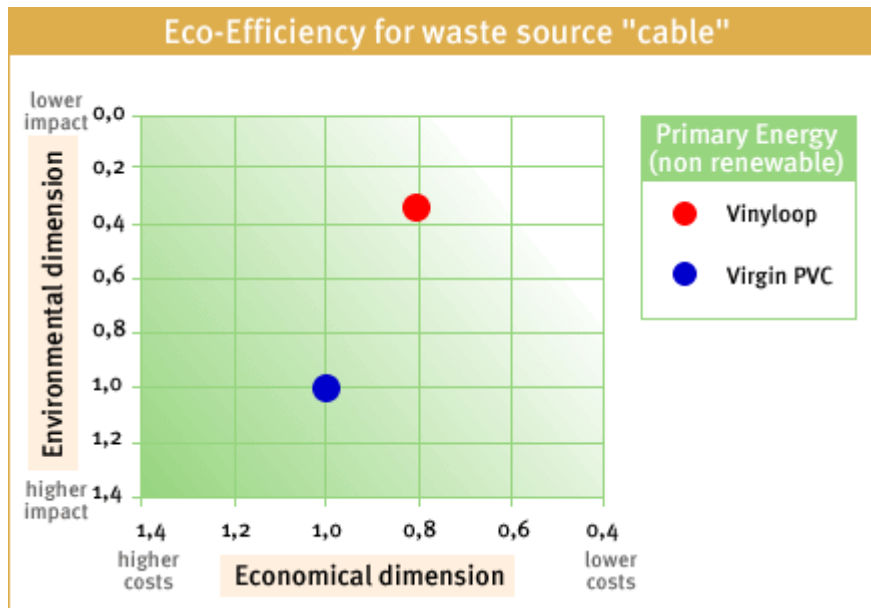


Abbildung 30: PVC-Compound-Regenerat aus Kabelabfällen mit frischem Compound<sup>76</sup>

### 5.3.4 Chemisches (rohstoffliches) Recycling

Es gibt einige Ansätze für chemisches Recycling. Dabei würde mit chemischen Reaktionen, Pyrolyse oder Vergasung Grundkörper für die Petrochemie wie CO, H<sub>2</sub> erzeugt, die wieder für die Herstellung von Monomeren eingesetzt werden können. Bislang sind diese Verfahren aber noch nicht soweit entwickelt, dass ausreichende Anlagengrößen für die wirtschaftliche Beurteilung der Verfahren gebaut werden können. Da hiermit aus Abfällen die gefährlichen Stoffe wie zum Beispiel Cadmium ausgesondert werden könnten, wäre diese Technologie eine Perspektive für die Zukunft.

<sup>76</sup> Solvay S.A; PVC-Compound-Rezyklat ist ökoeffizienter als Neuware; Internetartikel; <http://www.vinyloop.com/sustainable/ecoefficiencyvirginproduct/0,39506-4-0,00.htm>

## 6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Themenfeldanalyse resümiert und die vorgeschlagenen Bewertungen zusammengefasst.

Bei Hart-PVC liegen positive Schwerpunkte vor allem in der Rohstoffverfügbarkeit, im vergleichsweise geringen Energiebedarf für die Herstellung der PVC-Matrix und auch im Sozialbereich bei der Arbeitssicherheit. Weiters werden auch hinsichtlich des Preises und der technischen Eigenschaften sowie bei der Gebrauchseignung Vorteile von PVC-Produkten von Seiten der Industrie und auch von den Anwendern argumentiert.

In wesentlichen der kontrovers diskutierten Themenfelder ist die Situation mittlerweile bereinigt. Dies betrifft vor allem weite Bereiche der Rohstoffbereitstellung durch die Chlorchemie, die Arbeitsplatzbedingungen in den Anlagen der Chlorchemie und bei der Verarbeitung des Compounds, die Gesundheitsbelastungen bei der Nutzung, die Vermeidung von Cadmium als Stabilisator sowie die geordnete Abfallentsorgung. Durch den Stand der Umwelttechnik bei Abfallverbrennungsanlagen und Deponien in Österreich werden Belastungen von Mensch und Umwelt ausgeschlossen. Der Ausstieg aus dem Einsatz von Bleiverbindungen ist speziell in Österreich weit fortgeschritten, mit dem vollständigen Ausstieg ist nach den Zielen der PVC-Industrie in Europa jedenfalls bis 2015 zu rechnen, wobei wesentliche Hersteller diesen Ausstieg derzeit bereits vollziehen.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich die erzielten Verbesserungen anzunehmender Weise auf Europa, derzeit möglicherweise auf Mittel- und Westeuropa, beschränken. Produktionsstandorte in Fernost und Übersee können davon deutlich abweichende Bedingungen aufweisen. Es ist daher wichtig, die Rohstoffbereitstellungskette zu dokumentieren, was im Rahmen einer Herkunftsdeklaration möglich wäre.

Noch nicht vollständig entspannt - aber eine eindeutig positive Tendenz - zeigt die Situation bei der Umstellung der Elektrolyse auf das Membranverfahren sowie im Altmaterialeinsatz beim Recycling. Hier liegen die Lösungen bereits vor, Handlungsbedarf besteht in der weiteren kontinuierlichen Umsetzung.

Wegen des Chloranteils und der geringeren thermischen Nutzungsmöglichkeit sollte bei PVC stoffliches Recycling, bei dem sowohl der fossile als auch der mineralische Teil genutzt wird, im Vordergrund stehen. Technologien für werkstoffliches Recycling bestehen, es existieren auch Sammelsysteme, die derzeit allerdings nur geringe Mengen bewegen. Dies liegt vor allem an der Langlebigkeit der Produkte, von denen der Großteil noch in Verwendung ist. Bei den erwarteten zukünftig steigenden Abfallmengen ist bei ausreichenden Sammelsystemen in Zukunft vor allem bei Hart-PVC-Produkten mit deutlich steigendem Altmaterialeinsatz in der Produktion zu rechnen, was die Stoffwirtschaft von PVC deutlich verbessern würde. Unter Berücksichtigung des jeweiligen Sammelaufwandes sollten jedenfalls möglichst hohe Sammelquoten angestrebt werden. Die Abtrennung der Schwermetalle Blei und – vor allem Cadmium – ist dabei eine große Herausforderung im Sinne eines optimalen Stoffstrommanagements: Auch wenn diese bedenklichen Schwermetalle bei Hart-PVC stabil in die Matrix eingebunden sind, ist doch aus Stoffstromsicht eine Verteilung in unterschiedliche Produkte abzulehnen. Eine Zwischenlösung könnte die Begrenzung des Einsatzes derartig belasteter Altmaterialien auf einzelne, langlebige Produktionsbereiche mit einer speziellen Kennzeichnung sein.

Generell würde die Deklaration der verwendeten Additive eine Abgrenzung jener Produkte, die auf unbedenkliche Additive setzen, von den Produkten mit niedrigerem Umweltstandard erlauben.

Ein weiterer häufiger Kritikbereich ist das Brandverhalten von PVC Produkten. Die detaillierte Betrachtung der einzelnen Aspekte des Brandverhaltens zeigte hier Vorteile beim Brandrisiko durch geringere Entflammbarkeit der PVC-Matrix. Nachteile entstehen durch die Chlorwasserstoffbildung, die allerdings weniger zu Gesundheitsgefährdung als zu höherer Rauchdichte und Korrosionsgefahr bei Stahlbauteilen, Blechen und Elektronik je nach Nutzungsart und den verwendeten Produkten führen kann.

Hinsichtlich der Personengefährdung bei Bränden zeigt sich eindeutig Kohlenmonoxid (CO) als dominanter Schadstoff. Das in Zusammenhang mit PVC-Bränden viel zitierte Dioxin tritt bei Anwesenheit von Chlor bei Bränden zwar generell auf, hat aber hinsichtlich der Dioxinbilanz und der Todesfälle bei Bränden keine Bedeutung. Die nachfolgende Ergebnis-Zusammenstellung zeigt die für PVC relevanten Themenfelder und die Bewertung auf Grund der durchgeführten Analyse für Hart-PVC.

Erläuterung zur Bewertung:

+	Situation generell oder durch erfolgte Problemlösung vorteilhaft
O	Situation neutral oder nunmehr unbedenklich, bei größerer Tragweite eines Risikos nur minimale Wahrscheinlichkeit
>	Die Lösung kontroverser Situationen ist vorhanden, deutliche Verbesserungen sind bereits erfolgt
-	Nachteil von PVC, aber ohne ein Gefahrenpotenzial, das eine Rechtfertigung für Marktbeschränkungen darstellen würde
!	Es besteht Handlungsbedarf, um Gefahrenpotenzial zu mindern oder Anwendungsbeschränkungen abzuwenden

Tabelle 8: Ergebniszusammenstellung für Hart-PVC

<b>Hart-PVC</b>		
<b>Rohstoffbereitstellung</b>	Rohstoffverfügbarkeit	+
	Chlorherstellung mit Chlor-Alkali-Elektrolyse	>
	PVC und die Vermeidung der Chlorchemie	0
	Risiko der technischen Anlagen	0
	Umweltbelastungen durch die Chlorchemie	0
	Energiebedarf und Klimarelevanz	+
	Wertschöpfung durch Koppelprodukte der Elektrolyse	+
	Transportrisiko	0
	PVC-spezifische Belastungen am Arbeitsplatz	0
	Arbeitsunfälle	+
<b>Produktherstellung</b>	Stabilisatoren	0
	Farbpigmente	0
	Energiebedarf der Verarbeitung	0
	Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz	0
<b>Nutzungsphase</b>	Anwendungsschwerpunkte von PVC in Österreich	+
	Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Stabilisatoren	0
	Umwelt- und Gesundheitsgefährdung durch Farbpigmente	0
	Kostenvorteil PVC	+
	Technische Eignung der Produkte	+
	Brandrisiko	+
	Brandverhalten und Folgekosten im Brandfall	-
	Personengefährdung im Brandfall	0
	Bildung von persistenten toxischen Substanzen bei Bränden	0
<b>Entsorgung</b>	Die aktuelle Abfallsituation bei PVC	0
	Umweltbelastungen durch Stabilisatoren und Farbpigmente	0
	Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen	0
	Mehrkosten in der Abfallverbrennung durch PVC	0
	Altmaterialeinsatz durch Recycling	>

## 7 Literaturübersicht

- 1 PVCplus Kommunikations GmbH; Initiative PVC plus - PVC Werkstoff;  
<http://www.pvcplus.de/index.php?id=50>
- 2 API PVC- und Umweltberatung; Internetartikel; <http://www.pvc.at/d/api.htm>
- 3 Europäische Kommission; Internetartikel, : Polyvinyl Chloride (PVC); Feb. 2007  
<http://ec.europa.eu/environment/waste/pvc/index.htm>
- 4 GUA GmbH; Kunststoffe und Energiebedarf; November 2005
- 5 <http://de.wikipedia.org/wiki/Chlor-Alkali-Elektrolyse>
- 6 OR Ing. Heribert Ulrich; Positionspapier des BMWA; PVC im Baugewerbe; 1999
- 7 Tötsch W., Gaensslen; Polyvinylchlorid, zur Umweltrelevanz eines  
Standardkunststoffs; Köln 1990
- 8 <http://de.wikipedia.org/wiki/Chlor-Alkali-Elektrolyse>
- 9 Eurochlor; <http://www.eurochlor.org/animations/diaphragm-cell.asp>
- 10 Umweltbundesamt Berlin; National Focal Point – IP; Integrierte Vermeidung und  
Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Referenzdokument über die  
Besten Verfügbaren Techniken in der Chloralkaliindustrie; Dezember 2001
- 11 Eurochlor; <http://www.eurochlor.org/index.asp?page=180>; Daten aus dem EPER;  
2004
- 12 Rothert A.; Positionen zur Chemie mit Chlor - VCI Internetartikel; Nov. 2005
- 13 Umweltbundesamt Deutschland; Integrierte Vermeidung und Verminderung der  
Umweltverschmutzung (IVU; Referenzdokument über die Besten Verfügbaren  
Techniken in der Chloralkaliindustrie)  
<http://www.bvt.umweltbundesamt.de/archiv/chloralkaliindustrie.pdf>; Dez. 2001;
- 14 VCI-Publikation; Im Dialog; September 1997
- 15 UNEP United Nations Environment Programme; Global Mercury Assessment;  
<http://www.chem.unep.ch/mercury/Report/Chapter6.htm#6.2>; Feb. 2003
- 16 VCI Verband der chemischen Industrie; Die Zukunft der Amalgam-Anlagen in  
Deutschland; November 2006
- 17 Eurochlor; Chlorine Online, How is chlorine made;  
<http://www.eurochlor.org/index.asp?page=76> ?; Daten aus dem EPER ;2004
- 18 Europäische Kommission; Life Cycle Assessment of PVC and of principal  
competing materials; Commissioned by the European Commission; July 2004
- 19 Koller U; Umweltberatung Bayern; Fachinformation „Umwelt und Gesundheit“;  
[http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/pvc\\_2000\\_abb.htm](http://www.bayern.de/lfu/umwberat/data/chem/stoff/pvc_2000_abb.htm); April 2000
- 20 VCI (Verband der chemischen Industrie); Die Zukunft der Amalgam-Anlagen in  
Deutschland; November 2006
- 21 RWI Essen; Die Klimaschutzerklärung der deutschen Industrie vom März 1996 –  
eine abschließende Bilanz; Monitoring-Bericht 2000, Fortschrittsberichte der  
Verbände
- 22 wik-Consult – FhG Verbund Energie; Bericht, Bad Honn; Dezember 2006
- 23 KfW Bankengruppe, Abteilung Volkswirtschaft; Energie effizient nutzen: Klima  
schützen, Kosten senken, Wettbewerbsfähigkeit steigern; [http://www.competence-site.de/energie.nsf/4C4FCDAC981D3E3FC1257076002706D7/\\$File/sonderpublikation\\_energieeffizienz\\_kfw\\_bankengruppe.pdf](http://www.competence-site.de/energie.nsf/4C4FCDAC981D3E3FC1257076002706D7/$File/sonderpublikation_energieeffizienz_kfw_bankengruppe.pdf); Juli 2005
- 24 Verband der chemischen Industrie (VCI); Zukunft der Alkalichlorid-Elektrolyse-  
Anlagen nach dem Amalgam-Verfahren; März 2001
- 25 VCI; Grafik erstellt nach Daten der Selbstverpflichtung der VCI
- 26 GUA GmbH; The Contribution of Plastic Products to Resource Efficiency; 2005
- 27 PlasticsEurope; Präsentation PVC-Workshop, 13.12.2006
- 28 Pötzsch M.; Dissertation Bergische Universität Wuppertal; Risikobewertung des  
Transports von Chlor mit Binnentankschiffen auf d. Rhein unter besonderer  
Beachtung des Gefahrgutrechts; 2004

- 29 *Arbeitsmedizin Wien und Unfallverhütungsberichte der Deutschen Bundesregierung; Auskunft*
- 30 *Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt: Wissenswertes über PVC, August 2005*
- 31 *AUVA; Angaben zu Arbeitsunfällen mit 2000 Jahresarbeitsstunden errechnet*
- 32 *FCIO; Jahresbericht der chemischen Industrie; Wien 2005*
- 33 *API Wien; Internetartikel; PVC-Compounds von EVC auf pflanzlicher Basis; [http://www.pvc.at/d/news\\_at\\_0205.htm](http://www.pvc.at/d/news_at_0205.htm); Feb. 2005*
- 34 *European Commission; Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials; Commissioned, July 2004*
- 35 *Greenpeace; Chlorchemie Situation in Österreich: Situation in Österreich; <http://www.greenpeace.at/1154.html>*
- 36 *API und Umweltberatung; Daten über die Anwendung von PVC-Harz in Österreich basierend auf Statistik Austria; pers. Mitteilung*
- 37 *UBA-DE, Fraunhofer Institut, Ökopol; Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe; Februar 2003*
- 38 *AgPU; Produktions- Verbrauchs- u. Abfalldaten für Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung; 2004*
- 39 *Bodo Möller Chemie GmbH- Offenbach am Main; Prozess- und Hitzestabilisatoren, <http://www.bm-chemie.de/content/de/kunststoffadditive/hitzestabilisator.shtml>*
- 40 *Fraunhofer Institut ICT; Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC); Pfinztal, Mai 2005*
- 41 *UBA DE; Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC; 14.07.2003*
- 42 *BMLFUW; Gesamtbericht; Behandlungs- und Verwertungswege für PVC-Abfälle; Dezember 2002*
- 43 *UBA DE; Substitution von PBT\*- Stoffen in Produkten und Prozessen, Leitfaden zur Anwendung umweltverträglicher Stoffe für die Hersteller und gewerblichen Anwender gewässerrelevanter Chemischer Produkte; Teil5; Berlin, Februar 2003*
- 44 *Leoni Gruppe; Umwelterklärung, 12.2.2004*
- 45 *PE Europe GmbH; Ökobilanzierung von PVC und wichtigen Konkurrenzwerkstoffen; Im Auftrag der Europäischen Kommission; April 2004*
- 46 *AgPU, API, PVCH, VKE; Abbildung nach Daten aus „PVC daten, fakten, perspektiven“; aktualisierte Fassung; Mai 2003*
- 47 *Fraunhofer ICT; Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid, S.37; 2005*
- 48 *Patrick Moore; Interview mit auf ABC Radio Nationa; Originalinterview: [www.abc.net.au/rn/counterpoint/](http://www.abc.net.au/rn/counterpoint/) und <http://www.youtube.com/watch?v=n6M-ci4FQss>; Australien 2004*
- 49 *Enquête-Kommission; Bericht Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft; 1994*
- 50 *Bayrisches Landesamt für Umweltschutz; Schadstoffe bei Brandereignissen; 2004*
- 51 *Hirschle; Journal of Sciences 5, 289 ;1987*
- 52 *Schießl P; Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde; Technische Universität München*
- 53 *Schmacher L.; pw-Internet Solutions GmbH: Die Baustoffklassen; Mönchengladbach; [http://www.baumarkt.de/b\\_market/fr\\_info/brandbau1.htm](http://www.baumarkt.de/b_market/fr_info/brandbau1.htm)*
- 54 *Rotard W.; Gefahrstoffe nach Bränden – Sanierungsleitwerte in Sanierung von Brandschäden; Vortragsband einer Fachtagung des VdS e.V.; Köln; 1996*
- 55 *[http://www.biw.fhd.edu/alumni/2002/stiebinger/sem-brandschutz/bv\\_beton.htm](http://www.biw.fhd.edu/alumni/2002/stiebinger/sem-brandschutz/bv_beton.htm); Brandverhalten von Beton*
- 56 *Hammer; Sanierung von Brandschäden; Vortrag auf der VdS Fachtagung, Köln 1996*

- 57 Verband der Schadensversicherer VdS; Richtlinie zur Brandschadensanierung; VdS-Richtlinie 2357; 1998
- 58 Engelmann M., Skura J.; PVC im Brandfall; Gummi, Fasern, Kunststoffe, Nr.49; 1996
- 59 Deutsches Gesundheitsamt;  
://www.gesundheitsamt.de/alle/umwelt/chemie/luft/diox/infobl.htm
- 60 Arbeitsgruppe Dioxin; <http://www.hygiene.ruhr-uni-bochum.de/hygiene/dioxin/dioxin-information.html>; 2007
- 61 Umweltbundesamt Österreich; Emissions-Trends in Österreich; 2005
- 62 Fachinformation Umwelt und Gesundheit; Polyvinylchlorid (PVC); Stand: April 2000
- 63 Ruhr-Universität Bochum und Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen; Umweltmedizinische Untersuchungen an Feuerwehrleuten; 1993
- 64 Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen; Dokumentation Grossbrand Lengerich; 1994
- 65 API; [http://www.pvc.at/d/news\\_eu\\_0505.htm](http://www.pvc.at/d/news_eu_0505.htm) ; 2007
- 66 Oekokauf Wien;  
<http://www.wien.gv.at/umweltschutz/oekokauf/pdf/chlororganisch.pdf>
- 67 European Commission; Study for DG XI; Mechanical Recycling of PVC Wastes; Prognos 2000
- 68 TuTech GmbH; Contribution of Post-Consumer PVC Products to Lead Inventory in Landfilled Waste; Hamburg; Jun. 2001
- 69 Rieber, Boeke, Saffert, Lindner; Recycling von bleihaltigem Alt-PVC; 1995
- 70 Bertin Technologies, The influence of PVC on quantity and hazardousness of flue gas residues from incineration, Study for DG XI, April 2000
- 71 Vehlow J.; Waste combustion and the dioxin issue; Korean Institute of Science and Technology (KIST); Europe Environmental Technology Workshop; Saarbrücken 1997
- 72 Dr. H.-R. Paur; Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Multifunctional Scrubber for Incineration Plants; Simultaneous Removal of Mercury, Submicron Particles, and Dioxins
- 73 Kirrman; Incineration of PVC and other products in MSW; Nov. 2000
- 74 AGPU; Consultic-Studie: Produktions-, Verbrauchs- und Abfalldaten für PVC in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung; 2005
- 75 GUA; „Altfenster aus PVC – Mengenerhebung 2005“
- 76 Solvay S.A; PVC-Compound-Rezyklat ist ökoeffizienter als Neuware;  
Internetartikel;  
<http://www.vinyloop.com/sustainable/ecoefficiencyvirginproduct/0,39506-4-0,00.htm>