

**PVC und seine Geschichte –
Vorzeigeprodukt der chemischen Industrie oder ökologischer Problemfall?**

Schriftliche Hausarbeit im Rahmen
der Ersten Staatsprüfung für das
Lehramt für die Sekundarstufe II

dem
Staatlichen Prüfungsamt Köln

vorgelegt von

Holger Stawitz

Berichterstatter: Prof. Dr. Klemmer
Institut für Lebensmitteltechnologie

Bonn 2005

Inhaltsverzeichnis:

<u>Kapitel</u>	<u>Seitenzahl</u>
1. Einleitung: Das Zeitalter der Kunststoffe	1
2. Die historische Entwicklung – 1835-1945	3
2.1. Makromolekulare Naturstoffe als Vorbild	3
2.1.1. Beispiel: Gummi	3
2.1.2. Beispiel: Cellulose	5
2.2. Die Entdeckung des PVC	7
2.3. Weitere Versuche	8
2.4. Industrielle Verfahren des PVC	9
2.4.1. Herstellung der Ausgangsstoffe	9
2.4.1.1. Darstellung von Acetylen	10
2.4.1.2. Darstellung von Ethylen	10
2.4.1.3. Darstellung von Chlor	12
2.4.2. Polymerisationschemie	14
2.4.3. Technische Verfahren	18
2.4.4. Schema der PVC-Herstellung	20
2.5. Eigenschaften von PVC	21
2.5.1. Verfahrenstechniken	22
2.5.2. Einführung der Additive	23
2.5.2.1. Stabilisatoren	24
2.5.2.2. Gleitmittel	26
2.5.2.3. Füllstoffe	27
2.5.2.4. Flammschutzmittel	27
2.5.2.5. Weichmacher	29
2.5.2.6. Farbstoffe	32
2.5.2.7. Weitere Additive	32
2.5.3. Verarbeitungsverfahren	33

3. Der PVC-Boom der Nachkriegszeit – Die 50er bis 70er	35
3.1. Die wirtschaftliche Entwicklung	36
3.1.1. Beispiel: Die wirtschaftliche Entwicklung der PVC-Rohre	39
3.2. Produktpalette	40
3.2.1. Rohre (Hart-PVC)	42
3.2.2. Fenster/Profile (Hart-PVC)	43
3.2.3. Böden (Weich-PVC)	43
3.2.4. Kabelummantlung (Weich-PVC)	44
3.2.5. Weitere Produkte	44
3.3. Erste Bedenken	45
4. Bedenken gegenüber PVC – Die 80er und 90er	46
4.1. Toxikologische Bedenken	46
4.1.1. Gefahren der Ausgangsprodukte	47
4.1.1.1. Chlor	48
4.1.1.2. Vinylchlorid (VC)	48
4.1.2. Gefahren der Additive	50
4.1.2.1. Stabilisatoren	50
4.1.2.2. Weichmacher	51
4.1.2.3. Exkurs: Weichmacher in Kinderspielzeug	53
4.1.3. Gefahren bei Verbrennung	55
4.1.3.1. Dioxine und Dibenzofurane	55
4.1.3.2. Weitere Brandgase	58
4.2. Ökologische Bedenken	59
4.2.1. Umweltbelastung bei der Produktion	60
4.2.2. Umweltbelastung bei der Anwendung	62
4.2.3. Entsorgung	62
4.2.3.1. Werkstoffliches Recycling	64
4.2.3.2. Rohstoffliches Recycling	66
4.2.3.3. Verbrennung	67
4.2.3.4. Deponien	68

5. PVC - Wie geht's weiter? – Heute	70
5.1. Präventives Denken in der heutigen Gesellschaft	70
5.1.1. Beispiel: Das REACH-Programm	72
5.2. Die Zukunft des PVC	74
5.2.1. Nachhaltige Entwicklung	74
5.2.1.1. Beispiel: Nachhaltigkeit Fenster	76
5.2.1.2. Betrachtung ausgewählter Einzelbilanzen	79
5.2.1.3. Allgemeine Bilanz zu PVC	83
5.2.1.4. Forderungen	84
5.2.2. Alternativen	85
6. Schluss: Zusammenfassung	89
7. Literaturangaben	92
8. Abkürzungen	96
9. Anhang	97
10. Danksagung	102
11. Erklärung	103

Tabellenverzeichnis

<u>Tabellennummer und -name</u>	<u>Seitenzahl</u>
2.1 Einfluss der Füllstoffe	27
2.2 Wichtigste Phthalate	30
2.3 Mögliche Zusätze in Weich-PVC	33
3.1 Kunststoffherzeugung in der Welt	36
3.2 Kunststoffherzeugung in Westeuropa	37
3.3 Weltverbrauch einiger Kunststoffe	37
3.4 Produzierte Kunststoffe weltweit	37
3.5 Produktion verschiedener Kunststoffe 1980	38
3.6 Entwicklung der PVC Produktion	39
3.7 Produktion von PVC-Rohren	40
3.8 PVC-Verarbeitungsstruktur	41
3.9 Verarbeitung nach Produkteinteilung	42
3.10 Einsatzgebiete für PVC-Rohre	42
4.1 Wirkung der Weichmacher	52
4.2 Zusammenhang PVC-Anteil und Dioxin-Gehalt	58
4.3 Entsorgungswege in Deutschland von PVC-Produkten	63
5.1 Annahmen zur Bewertung von PVC-Fenstern	77
5.2 Indikatoren zur Nachhaltigkeit	77
5.3 Energieverbrauch der Kunststoffe	80
5.4 Energiebilanz	80

Vorwort

Die ökonomische, ökologische und soziale Komponente eines Werkstoffs zu untersuchen und zu bewerten, gehört in der modernen Gesellschaft zu einer der wichtigsten Aufgaben der Industrie. Diese Zielsetzung ist sehr bedeutend, insbesondere bei dem Kunststoff PVC, der uns durch seine Vielfalt ständig im Alltag begegnet. Auch die dauerhafte mediale Präsenz von PVC aufgrund der Kritik von Seiten der Ökologie-Verbände macht gerade diesen Kunststoff zu einem interessanten Fall.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine möglichst umfassende Betrachtung von PVC, also auch die Beschreibung der Technologie und natürlich der chemischen Vorgänge, durchzuführen.

Die Arbeit ist chronologisch aufgebaut, d.h. die einzelnen Aspekte des PVC werden anhand von historischen Abschnitten deutlich gemacht. Bei der Erarbeitung des Themas haben sich vier Stufen herauskristallisiert:

1. Die Entdeckung des PVC und die Fortschritte bis 1945 sowie die chemischen und technischen Ergebnisse, die in dieser Zeit erarbeitet wurden.
2. Der PVC-Boom der 50er bis 70er, in dem die wirtschaftlichen Aspekte und die Produktpalette behandelt werden.
3. Die toxikologischen und ökologischen Bedenken gegenüber PVC in den 80ern und 90ern.
4. Der Stand von PVC in der heutigen Gesellschaft und welche zukünftigen Veränderungen möglich und nötig sind. Die Einordnung des Werkstoffs PVC unter dem Stichwort „Nachhaltigkeit“, steht dabei im Vordergrund.

An einigen Stellen der Arbeit wird auf das exemplarische Vorgehen zurückgegriffen, da aufgrund der Fülle des Stoffes nicht alle Aspekte ausführlich behandelt werden können.

Die Arbeit ist fächerübergreifend. Wie oft in der Schule von Lehrern gefordert, ist auch die Untersuchung von PVC als Zusammenarbeit unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen zu verstehen. Zunächst ist die geschichtliche Herangehensweise bei der Darstellung von PVC zu beachten. Hinzu kommen biologische (Ökologie) und medizinische (Toxikologie) Aspekte. Die Untersuchung der wirtschaftlichen Entwicklung ist den Sozialwissenschaften zuzuordnen. Alle genannten Bereiche tragen also erst dazu bei, den Werkstoff PVC umfassend darzustellen.

Interessant zu erwähnen ist die bereits bei erster Sichtung der Literatur auffällige Diskrepanz der Bewertung von PVC zwischen den Quellen der Ökologie-Verbände und der Industrie. Es scheint fast so, als sprächen beide Seiten von einem unterschiedlichen Werkstoff. Insofern war die Bewertung und Einordnung der Literatur eine besonders wichtige Aufgabe. Bei einigen Quellen scheint dabei das endgültige Urteil ein wenig vorschnell und eher aus politisch-ideologischen oder wirtschaftlichen Gründen gefallen zu sein.

Die Arbeit trägt hoffentlich dazu bei die unterschiedlichen Positionen genau darzustellen und zu relativieren. Der Leser soll somit eine umfassende und auch vielfältige Übersicht über den Kunststoff PVC erhalten.

1. Einleitung: Das Zeitalter der Kunststoffe

Kunststoffe haben sich in der heutigen Zeit in fast allen Bereichen unseres Lebens etabliert, sei es als Werkstoff, im medizinischen Sektor oder als Konsumprodukt. Der Kunststoffchemiker und Nobelpreisträger für Chemie G.Natta sagte einmal über die Bedeutung der Kunststoffe: „Wenn unsere Zeit nach den Stoffen benannt würde, die sie charakterisieren, so wie man es mit der Stein-, Eisen- oder Bronzezeit getan hat, so würde die moderne Industriegesellschaft als das Zeitalter der Kunststoffe in die Geschichte eingehen“.

Wir sind von ihnen umgeben und jeder verwendet den Begriff Kunststoff ganz selbstverständlich. Aber was ist eigentlich darunter zu verstehen?

Eine Vielzahl von Definitionen ist möglich. Eine erste Definition stammt aus den 60er Jahren: „Kunststoffe sind Werkstoffe, die im wesentlichen aus einer organischen makromolekularen Substanz bestehen, zu irgendeinem Zeitpunkt ihrer Herstellung oder Verarbeitung plastisch verformt werden können und im Endzustand fest sind.“¹

Die heutige DIN-Definition lautet: „Kunststoffe sind Materialien, deren wesentliche Bestandteile aus solchen makromolekularen organischen Verbindungen bestehen, die synthetisch oder durch Abwandlung von Naturprodukten entstehen. Sie sind in vielen Fällen unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, Druck) schmelz- und formbar.“²

Jedoch kommen nach heutigem Verständnis weitere Punkte hinzu:

- Sie besitzen Molmassen von 10.000 – 300.000.
- Ihr Aufbau ist dadurch charakterisiert, dass in periodischer Folge einfach gebaute, niedermolekulare Verbindungen miteinander verkettet sind³.

In älteren Vorstellungsmodellen ging man bei den Makromolekülen von kolloidartigen Systemen aus. Erst Hermann Staudinger prägte die Idee von langen aneinandergelagerten Molekülketten, die aus einzelnen kleinen Bausteinen zusammengesetzt sind. Erst Anfang der 30er Jahre begann die Fachwelt Staudingers Arbeiten zu würdigen und 1953 erhielt er dafür den Nobelpreis für Chemie⁴.

Die Kunststoffe können bei ihrer Synthese durch unterschiedliche Herstellungsmethoden oder Zusätze sehr



Hermann Staudinger

¹ Becke, Jochen: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffe“, S.17

² Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Kunststoffe

³ Wagner, Fem: „Kunststoffe in der Praxis“, S.7

⁴ KMV(Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, S.24

variabel in ihren Eigenschaften gestaltet werden. Man bezeichnet sie daher auch als „Werkstoffe nach Maß“⁵.

Die Synthese von Kunststoffen ist ein eigener großer Bereich der organischen Chemie. Sie stellt einen großen Zweig der chemischen Industrie dar und bestimmt somit nicht nur einen Großteil unserer Lebens- sondern auch Arbeitswelt.

Polyvinylchlorid (im folgenden PVC) ist dabei einer der wichtigsten Kunststoffe. Er stellt nach den Polyolefinen wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) die weltweit zweitgrößte Produktion dar⁶. PVC bietet durch unterschiedliche Herstellungsverfahren und Zusätze eine enorme Vielfalt an Eigenschaften.

Während Polyethylen und Polypropylen eher selten vom Verbraucher als eigenständige Kunststoffsorte erkannt werden, ist der Begriff PVC den meisten Leuten geläufig. Dieser Bekanntheitsgrad ist jedoch nicht nur auf die Beliebtheit des PVC zurückzuführen. Im Gegenteil:

PVC hat, besonders in den 80er Jahren, aufgrund negativer Schlagzeilen Aufmerksamkeit erregt. Dabei gab es von Seiten der Ökologie-Verbände schwere Kritik an dem Produkt, aber auch an der gesamten Branche. Die Produktionsverfahren, insbesondere die Chlorproduktion, wurden scharf angegriffen. Aber auch die PVC-Produkte selbst wurden sogar als schwer gesundheitsschädlich bezeichnet. Zudem trat ein Entsorgungsproblem einiger PVC-Produkte in den Vordergrund, da sich Ende der 80er Jahre eine Kunststoff-Müllkrise anzubahnen drohte.

Die Industrie schien von diesen Problematiken und den folgenden Attacken überrannt worden zu sein. Doch für die aufkommenden Problembereiche und Kritikpunkte wurden Lösungen von Seiten der Industrie in die Wege geleitet und das Image von PVC wurde konsequent gepflegt. Begriffe wie Emissionsgrenzen, Recyclingquoten und freiwillige Selbstverpflichtung sollen an dieser Stelle schon einen kurzen Einblick auf diese neue Strategie geben.

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ rückte in diesem Zusammenhang immer weiter in den Mittelpunkt: Die ökologische, ökonomische und später auch die soziale Komponente eines jeden Werkstoffs muss dabei genau untersucht und bilanziert werden. Dieses Vorgehen wird für kurz- und mittelfristige, aber insbesondere auch langfristige Auswirkungen angestrebt. Das präventive Denken hat sich heute in der Gesellschaft

⁵ Wagner, Fem.: „Kunststoffe in der Praxis“, S.1

⁶ Klemmer, G./Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“ S. 185

und auch in der Industrie durchgesetzt. Die Zukunft der kommenden Generationen soll im Bereich Umwelt und Ressourcen gesichert sein. Auch bzw. gerade für PVC wurden diese Untersuchungen angestellt. Somit steht die Betrachtung des Werkstoffs PVC in dieser Arbeit exemplarisch für den Umgang und die Betrachtung eines jeden Werkstoffs in der heutigen Gesellschaft.

2. Die historische Entwicklung – 1835-1945

Trotz der recht jungen Vergangenheit hat PVC viele Höhen und Tiefen erlebt und kann daher durchaus als „Kunststoff mit Geschichte“⁷ bezeichnet werden. Die Anfänge der Kunststoffe liegen jedoch weit vor den ersten Laborversuchen von Chemikern: Sie begegnen uns bereits bei den Naturvölkern.

2.1. Makromolekulare Naturstoffe als Vorbild

Wie bereits in der DIN-Definition von Kunststoffen erwähnt, können modifizierte Naturprodukte zu den Kunststoffen gezählt werden. So dienten makromolekulare Naturstoffe zunächst als Ausgangsmaterial zur Verwendung als Werkstoffe. Schließlich stellte man experimentell Modifikationen der Stoffe her, um verbesserte Eigenschaften für die Verarbeitung und Verwendung zu erhalten. Durch „Ausprobieren“ erfand man also gebrauchsfähigere Produkte, die das Alltagsleben erleichtern sollten.

Auch Gummi fällt somit unter die Kategorie Kunststoff: Es handelt sich ursprünglich um einen Naturstoff, der durch bestimmte Veränderungen bzw. Zusätze als Werkstoff gut einsetzbar gemacht wurde.

2.1.1. Beispiel Gummi

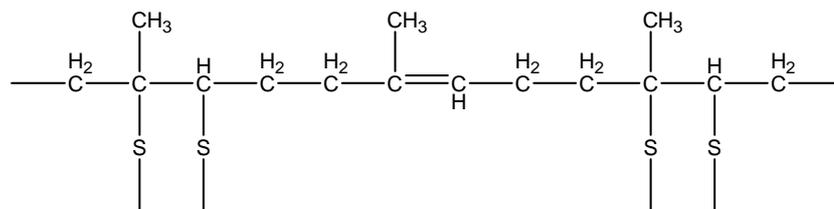
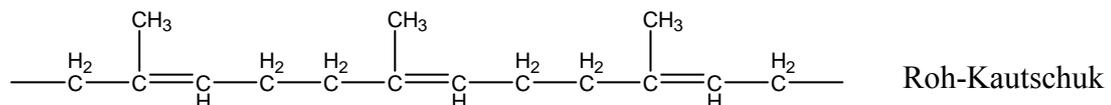
Bei der Erforschung Amerikas vor rund 450 Jahren berichteten die Entdecker von Bällen, mit denen die Ureinwohner spielten und die beim Aufprall wieder hochsprangen⁸. Der Stoff wurde auch als Abdichtmasse von Booten verwendet. Zunächst war nur bekannt, dass es sich um einen bestimmten Baumharz handeln sollte: Kautschuk. Man erhielt das Produkt durch Ritzen der Rinde des Gummibaums. Die auslaufende Substanz, auch Latex-Saft genannt, wurde gesammelt. Durch Säurezugabe zu diesem Saft konnte man den Kautschuk abtrennen und als

⁷ Löhr, Katja: „Umweltbildung und Chemieunterricht am Beispiel PVC“, S.52

⁸ Vgl.: Becke, Jochen: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffe“, S.19

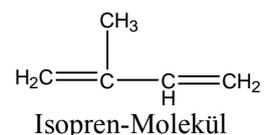
Rohmaterial isolieren. In Europa war der Stoff erstmals 1770 in Erscheinung getreten. Der Naturforscher J. Priestley hatte eine Probe der Substanz aus Amerika erhalten und genauer untersucht. Dabei stellte er fest, dass der Stoff verschiedene praktische Eigenschaften für die alltägliche Anwendung besaß. Er empfahl das Produkt als Radierer für Bleistiftstriche. Jedoch brachte der reine Naturkautschuk auch einige nachteilige Eigenschaften mit sich, die sich auch auf die Verarbeitung und Verwendung auswirkten. Insbesondere Temperaturschwankungen war der Stoff nicht gewachsen. In der Kälte wurde er schnell brüchig, bei Wärme wurde er schmierig. 1839 erfand der Amerikaner Ch. Goodyear ein Verfahren, das die Nachteile des Rohkautschuks beseitigte: Die Vulkanisation⁹.

Beim Vulkanisieren wird dem Rohkautschuk eine bestimmte Menge Schwefel beigemischt. Dabei bilden sich Sulfidbrücken zwischen den Molekülketten aus¹⁰. Die Ketten können somit nicht mehr beliebig aneinander vorbei gleiten und der Stoff wird besser handhabbar. Je nach Schwefelmenge erhält der Stoff unterschiedlich stark ausgeprägte neue Eigenschaften.



Das gewonnene Produkt zeichnet sich durch sehr gute gummielastische Eigenschaften aus und ist zudem erheblich robuster als der Rohkautschuk.

Ch. Goodyear gründete 1898 die „Goodyear Tire and Rubber Company“, die zu einem der weltgrößten Unternehmen auf dem Gebiet der Gummiproduktion wurde.



1905 wurde der Grundbaustein des Kautschuk entdeckt:

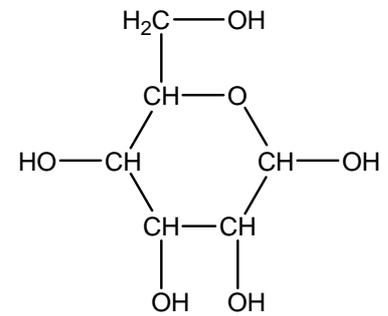
Das Isopren. Daraufhin war die Entwicklung von synthetischem Kautschuk nur noch eine Frage der Zeit.

⁹ Vgl.: Becke, Jochen: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffe“, S.20

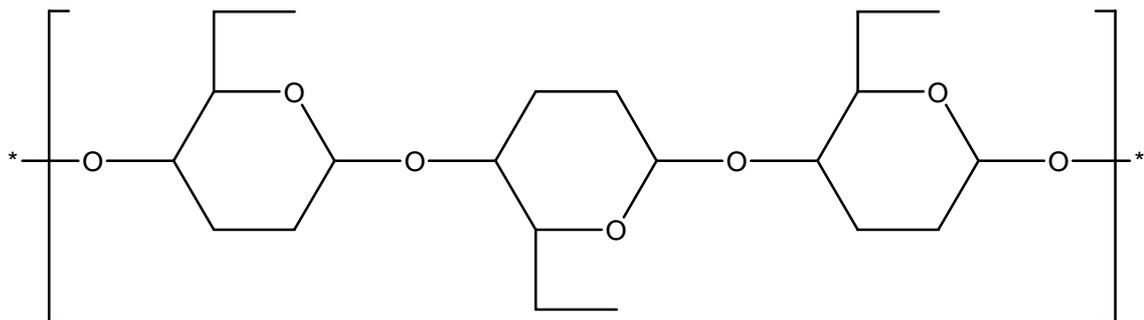
¹⁰ Vgl.: Römpp Chemie-Lexikon, Stichwort: Vulkanisation

2.1.2. Beispiel: Cellulose

Mit Cellulose als Ausgangsstoff begann Mitte des 19. Jahrhunderts die eigentliche Erforschung und Entwicklung der Kunststoffe. Cellulose ist der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände und bildet damit das Gerüst einer Pflanze. Voraussetzung zur Herstellung von Kunststoffen auf Cellulose-Basis ist, dass eine möglichst reine Cellulose verwendet werden muss. Baumwolle, die seit Anfang des 19. Jahrhunderts einen wirtschaftlichen Boom erlebte, bot sich als Grundstoff an: Die Cellulose liegt dort praktisch in begleitstofffreier Form als Faser vor. Die Faser besteht aus nebeneinander liegenden Cellulose-Ketten. Cellulose selbst besteht aus 2000-3000 Glucose-Molekülen, die glycosidisch miteinander verknüpft sind.



Glucose-Molekül



Cellulose-Molekül

Einer der ältesten Kunststoffe überhaupt, „**Vulkanfieber**“, besteht hauptsächlich aus Cellulose¹¹. 1846 mischten die französischen Chemiker J.A.Poumarede und L.Figuier reine Cellulose mit konzentrierter Schwefelsäure. Sie erhielten dabei eine pergamentpapier-ähnliche Masse. 1859 stellte der englische Chemiker T.Taylor eine ähnliche Wirkung bei der Behandlung von Cellulose mit einer Zinkchlorid-Lösung (ZnCl₂) fest. Daraus entstand die Idee der Kunststoffproduktion in großtechnischem Maße.

Schon einige Jahre später kam es zur ersten fabrikmäßigen Herstellung von Vulkanfieber in Amerika. Ab 1910 entstanden auch Fabriken in Mittel-Europa. Die großtechnische Kunststoff-Herstellung hielt Einzug in die moderne Industriegesellschaft.

¹¹ Vgl.: Becke, Jochen: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffe“, S.29

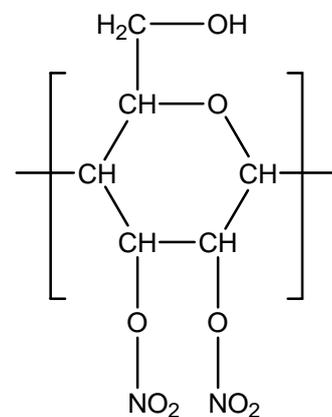
Das Herstellungsverfahren bediente sich sehr einfachen Elementen, sodass die Massenproduktion gut realisiert werden konnte: Die Baumwolle wird als Papierbahn bei 40-70°C durch eine 70%ige ZnCl₂-Lösung gezogen. Dabei quillt die Oberfläche auf und wird gummiartig. Die Bahnen werden auf große Zylinder gerollt und unterliegen einem Reifeprozess von ein paar Tagen. In den folgenden Monaten wird die überschüssige ZnCl₂-Lösung ausgewaschen und das Rohprodukt auf einem beheizten Zylinder getrocknet. Im Endzustand zeichnet es sich durch eine Vielzahl von günstigen Eigenschaften aus: Das Produkt ist zäh, biegsam, beständig und gut zu verarbeiten. Das Vulkanfieber wurde lange Zeit als Ersatz von Gummi und Leder zur Herstellung von z.B. Koffern und Dichtungen verwendet.

Ein weiterer Kunststoff auf Cellulose-Basis ist **Celluloid**, das erstmals 1845 von dem Chemieprofessor C.Schönbein hergestellt wurde¹². Der Hauptbestandteil ist Nitrocellulose. Es ist auch der erste Kunststoff, der einen Weichmacher, das Campher, als Zusatz enthielt. Erst 1869 entwickelte J.W.Hyatt ein Verfahren, mit dem die Herstellung dieses Kunststoffes rentabel wurde. Der Kunststoff wurde als Elfenbeinersatz für Billardkugeln eingesetzt¹³. Es werden Celluloseflocken mit Nitriersäure (Gemisch aus Schwefelsäure H₂SO₄ und Salpetersäure HNO₃) versetzt und es kommt zur Veresterung der OH-Gruppen der Glucosemoleküle.

Die Menge der Nitriersäure wird so gewählt, dass nur 2 OH-Gruppen reagieren. Zur Verbesserung der Eigenschaften wird dieses Produkt unter Druck mit Campher gemischt.

Die Eigenschaften des Celluloid waren auch sehr günstig für die Verarbeitung. Es handelt sich um einen thermoplastischen Kunststoff, der zäh und hornartig ist. Celluloid konnte somit vielfältig eingesetzt werden. Jedoch zeigte der Kunststoff auch negative Eigenschaften, die das Celluloid

langsam von der Bildfläche verschwinden ließen: Es ist sehr leicht entflammbar und sorgte in den 30er Jahren für einige Kino-Brände, da die Filme auf Celluloid-Band gespielt waren und durch die heißen Lampen der Abspiegelgeräte entzündet wurden.



Ausschnitt Celluloid

¹² Vgl.: Becke, Jochen: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffe“, S.33

¹³ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Celluloid

Außerdem kann Nitrocellulose bei der falschen Zusammensetzung¹⁴ sogar explosiv reagieren (Schießbaumwolle). Weitere Kunststoffe auf Basis von Cellulose sind die Zellwolle, das Zellglas oder Cellophan.

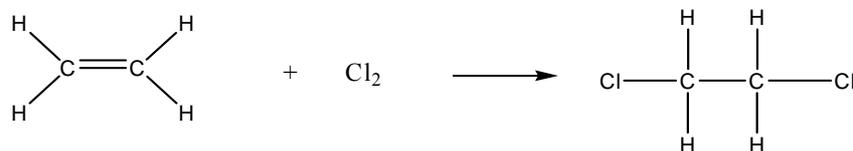
Auch weitere Naturprodukte wurden als Ausgangsstoff für Kunststoffe verwendet: Modifikationen von Proteinen werden heute zum Beispiel noch als Kunsthorn eingesetzt.

Nachdem man erkannt hatte, wie vielfältig einsetzbar und nützlich solche modifizierten Naturstoffe waren, ging man dazu über, aus kleinen Einheiten (Monomere) im Labor Makromoleküle zu synthetisieren und damit wurde das „Zeitalter der Kunststoffe“ eingeleitet.

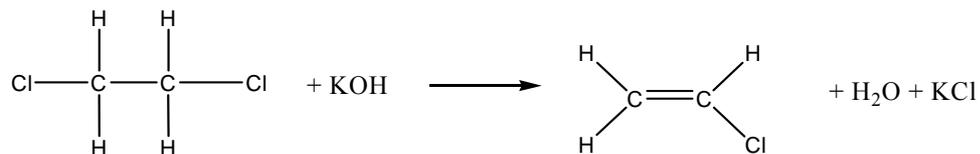
2.2. Die Entdeckung des PVC

Bereits im Jahr 1835 entdeckte Victor Regnault im Giessener Laboratorium von J.v.Liebig den Monomerbaustein des PVC¹⁵: Vinylchlorid (im folgenden VC, nach IUPAC Monochlorethen).

Zunächst stellte er über die Reaktion von Chlor mit Ethylen (nach IUPAC Ethen) Dichlorethan her.



Als er das Dichlorethan in alkoholischer Kalilauge reagieren ließ, entstand das farblose Gas VC.



Drei Jahre später forschte er weiter an VC. Von dieser Arbeit berichtete er, dass er das Gemisch eher zufällig dem Sonnenlicht aussetzte, wobei sich ein weißes Pulver absetzte¹⁶. Er konnte mit dieser Beobachtung jedoch nichts weiter anfangen. Er hatte aber auf diese Weise zum ersten Mal unfreiwillig PVC hergestellt¹⁷.

¹⁴ Cellulosenitrat mit Stickstoff-Gehalten von 12,3-13,7Gew% werden als Schießbaumwolle bezeichnet.

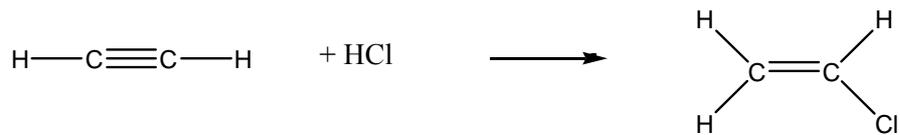
¹⁵ Vgl.: Felger, Hans: „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.38

¹⁶ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.24

¹⁷ Die Angaben zu den verwendeten Daten (Ort und Zeit) zur ersten Entdeckung von PVC durch V.Regnault weichen bei den unterschiedlichen verwendeten Quellen z.T. erheblich ab.

2.3. Weitere Versuche

1878 wurde das Monomer VC von E.Baumann systematisch untersucht¹⁸. Er erkannte dabei die Polymerisationsfähigkeit des Stoffes und hat diese als erster beschrieben. Doch erst 1912 kam es zur Aufklärung des Polymerisationsvorgangs durch Fritz Klatte¹⁹ (1880-1934). Zusammen mit dem Chemiker E.Zacharias meldete er im gleichen Jahr ein Patent auf die Herstellung von VC an. Dabei erhielten sie das Monomer durch Addition von Salzsäure an Acetylen (nach IUPAC Ethin):



Fritz Klatte

Dieses Verfahren sollte in den folgenden Jahren auch bestimmend sein. Im Jahr darauf, also 1913, meldete er auch ein Patent auf ein Verfahren zur Herstellung von PVC an. Er gilt damit auch als „Vater“ des Kunststoffes PVC. Jedoch hatte Klatte noch mit der thermischen Instabilität des Produktes „zu kämpfen“. „Die Entwicklung eines verkaufsfähigen Produktes scheiterte.“²⁰ Der erste Weltkrieg bremste zudem die weitere Forschung an PVC und im zerrütteten Nachkriegsdeutschland kam es zu keinen nennenswerten Verbesserungen im Forschungsbereich. 1926 gab die Firma Griesheim Elektron die Patente Klatte's auf²¹. Dies ermöglichte eine ausgedehnte Forschung anderer Unternehmen an PVC. Die folgenden Jahre waren geprägt von der fieberhaften Suche nach wirkungsvollen Zusätzen, die PVC besser verarbeitbar machen sollten.

1930 meldete die IG-Farben ein neues Patent zur Herstellung von PVC an²². 1934 gelang der BASF die Plastifizierung von Hart PVC bei 160°C „ohne dass die befürchtete Zersetzung eintrat“²³.

Der Weg war nun endgültig frei für die großtechnische Produktion. Und so sollte auch das Folgejahr 1935 der Durchbruch des Kunststoffes PVC werden. Die industrielle Produktion wurde in den Werken Wolfen und Bitterfeld aufgenommen.

¹⁸ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.29

¹⁹ Biederbick, Karlheinz: „Kunststoffe kurz und bündig“, S.75

²⁰ KMV (Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, S.21

²¹ KMV (Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, S.21

²² Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.29

²³ KMV (Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, S.22

Die neu gefundenen Zusätze hatten PVC zu einem möglichen Massenprodukt gemacht.

In den 30er Jahren, insbesondere von 1937-42, fand der Kunststoff PVC besondere Unterstützung durch den Staat, da dieser Werkstoff zum „Autarkie-Programm“ des Nazi-Regimes passte. So setzte sich in diesen Jahren auch die Terminologie „PVC – Ein deutscher Kunststoff“²⁴ durch. Zu Beginn der großtechnischen Anwendungen wurden bereits einige Tausend Tonnen pro Jahr produziert. Immer wieder wurden neue Verarbeitungsmethoden und Anwendungsformen für PVC entwickelt, sodass die Produktion weiter wachsen konnte.

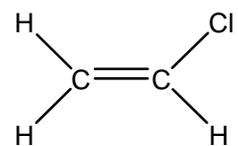
Im Zuge des zweiten Weltkrieges musste jedoch auch die PVC-Produktion der Kriegs-Maschinerie weichen. Erst nach Ende des Krieges konnte die industrielle Produktion langsam wieder aufgenommen werden.

2.4. Industrielle Verfahren des PVC

In den 30er Jahren wurden erste Fabriken in Deutschland zur Herstellung von PVC gebaut. Die Anlagen ermöglichten die Massenproduktion des Kunststoffes. Im Vergleich zu den Herstellungsverfahren anderer Kunststoffe, wie z.B. PE und PP, ist die Herstellung von PVC ein technisch anspruchsvoller, mehrstufiger Prozess. Bereits bei der Darstellung der Ausgangsprodukte wird dies deutlich.

2.4.1. Herstellung der Ausgangsstoffe

PVC besteht aus dem Grundbaustein Vinylchlorid (im folgenden VC), das nicht natürlich vorkommt und somit aus einfacheren Grundstoffen synthetisiert werden muss.



Vinylchlorid

In den 30er Jahren und bis Ende des zweiten Weltkrieges wurden Salzsäure und Acetylen als Ausgangsstoffe zur Synthese von VC eingesetzt. Erst nach Ende des zweiten Weltkrieges setzte sich das Ethylen als Ausgangsstoff gegen das Acetylen durch²⁵ und brachte somit eine Vereinfachung der Produktion von PVC.

²⁴ KMV (Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, S.22

²⁵ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1, Polyvinylchlorid“, S.39

2.4.1.1. Darstellung des Acetylen

Zunächst wurde VC auf der Basis von Acetylen produziert. Die Darstellung des Stoffes erfordert hohe Energien und aufwendige Prozesse, da er einen hohen Energiebehalt besitzt und sehr reaktiv ist.

Das älteste Verfahren zur Darstellung läuft über Calciumcarbid (CaC_2). Zunächst werden Kalkstein und Koks im Lichtbogen auf etwa 2000°C erhitzt und es entsteht Calciumcarbid und Kohlenmonoxid:

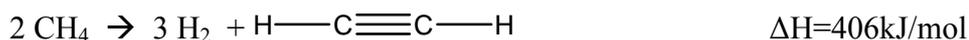


Das Produkt wird anschließend bei Raumtemperatur mit Wasser zu Acetylen und Calciumhydroxid umgesetzt²⁶:



Hierbei gewinnt man aus 1kg Carbid etwa 270 Liter Acetylen.

Die großtechnische Darstellung erfolgt auch über elektrochemische Verfahren. Dabei werden Kohle und elementarer Wasserstoff einem elektrischen Lichtbogen bei einigen tausend Grad Celsius ausgesetzt. Man erhält direkt das Acetylen und wenige nichtflüchtige Salze als Abfallstoffe. Heute ist diese klassische Darstellung aus den Elementen ohne technische Bedeutung. Größere Anwendung findet ein Herstellungsverfahren aus petrochemischen Grundstoffen, das auf ähnlicher Technik beruht. Es handelt sich dabei um die thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen, insbesondere von Methan, im elektrischen Lichtbogen:



Zur Herstellung von VC lässt man nun das Acetylen mit Salzsäure reagieren.

Diese Methode besitzt heute jedoch so gut wie keine Bedeutung mehr²⁷.

2.4.1.2. Darstellung von Ethylen

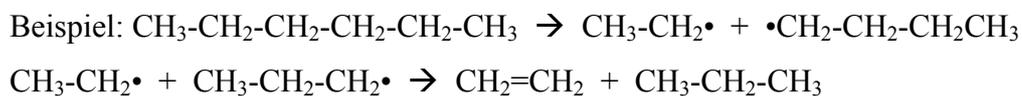
Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit des Ethylens aus Erdöl nach dem zweiten Weltkrieg wurde das Produktionsverfahren von PVC weitgehend auf diesen Ausgangsstoff umgestellt. Ethylen setzte sich vor allem aufgrund seiner günstigeren Eigenschaften gegen Acetylen durch: Es ist einfacher herzustellen, leichter zugänglich und gefahrloser zu handhaben. Ursprünglich wurde Ethylen durch partielle Hydrierung von Carbidacetylen, durch Dehydratation von Ethanol oder

²⁶ Vgl.: Vollhart: „Organische Chemie“, S.592

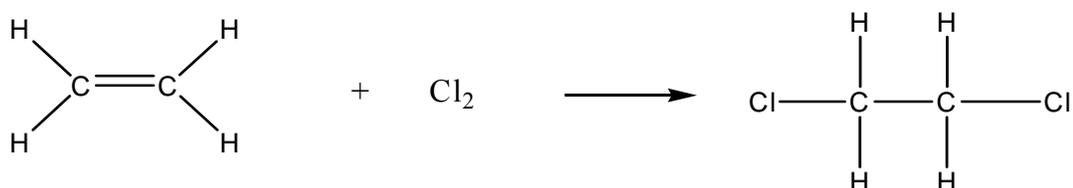
²⁷ Vgl.: Römpp: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Acetylen

durch Isolierung aus dem Koksofengas erhalten. In Ländern mit einer entwickelten Petrochemie sind diese Verfahren jedoch bedeutungslos²⁸.

Ethylen wird heute fast ausschließlich durch thermisches Cracken von Erdöl (Gemisch aus aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen) oder Erdgas gewonnen. Als Cracken bezeichnet man das Zerlegen von Kohlenwasserstoffen in kleinere Bruchstücke. Beim Cracken von Rohöl und anschließender Destillation erhält man verschiedene Fraktionen, eine davon ist das sogenannte Naphta oder auch Rohbenzin. Aus der Pyrolyse von Naphta kann man Ethylen gewinnen. Der Prozess der Pyrolyse beruht auf dem Einsatz von thermischer Energie. Erhitzt man Alkane auf höhere Temperaturen werden dabei CH- und CC-Bindungen radikalisch aufgebrochen²⁹.



Unter bestimmten Bedingungen (Katalysator, Temperatur, Druck) kann man die Produktverteilung beeinflussen und somit Kohlenwasserstoffe mit bestimmter Kettenlänge bevorzugt gewinnen. Bei Temperaturen von 750-850°C erhält man beispielsweise Ausbeuten von ca. 30% Ethylen. Jedoch erhält man immer nur ein Stoffgemisch verschiedener Kohlenwasserstoffe. Die einzelnen Produkte lassen sich durch Destillation rein voneinander trennen. So erhält man Ethylen wie auch weitere wichtige Produkte wie z.B. das Propan. In Deutschland wurden auf diese Weise im Jahr 1985 ca. 3,1 Mio Tonnen Ethylen pro Jahr gewonnen, wobei ca. 17% davon zur Produktion von VC³⁰ verwendet werden. Zur Herstellung von VC wird in einem ersten Schritt das Ethylen mit elementarem Chlor zu Dichlorethan umgesetzt.

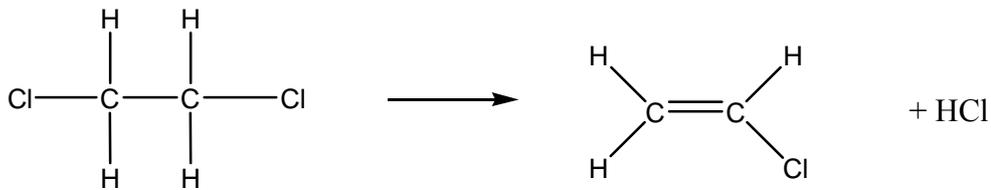


In einem zweiten Schritt wird, wiederum durch Pyrolyse, das Dichlorethan zu VC und Chlorwasserstoff gespalten:

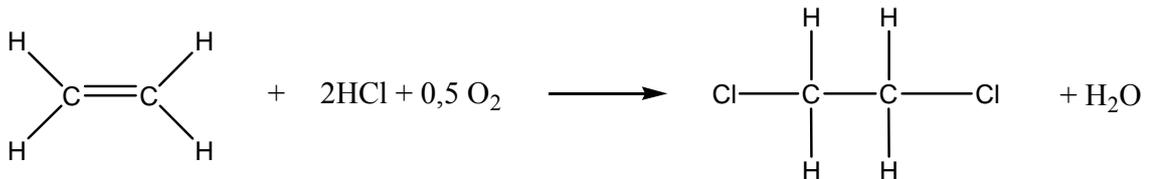
²⁸ Vgl.: Römpp: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Ethylen

²⁹ Vgl.: Vollhart: „Organische Chemie“, S.92

³⁰ Vgl.: Römpp: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Vinylchlorid



Der anfallende Chlorwasserstoff kann in einem weiteren Schritt, der sogenannten Oxichlorierung, wiederverwertet werden. Dabei wird Ethylen mit HCl in Anwesenheit von Sauerstoff bzw. Luft zu Dichlorethan umgesetzt³¹.

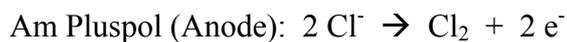


An diesen Prozess schließt sich wiederum die Abspaltung von HCl durch Pyrolyse an. Bei diesem Verfahren fallen keine größeren Mengen an Abfallprodukten an.

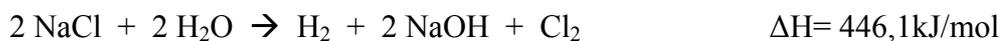
2.4.1.3. Darstellung von Chlor

Reines PVC besteht nur zu 43% aus Ethylen und zu 57% aus Chlor. Damit nimmt die Chlorproduktion eine wichtige Stellung bei der PVC-Herstellung ein. Die Chlordarstellung erfolgt über die Chloralkalielektrolyse. Dabei wird per Strom eine wässrige Natriumchlorid-Lösung (NaCl) zersetzt.

An den Polen laufen folgende Prozesse ab:



Als Gesamtbilanz erhält man:



Die technische Durchführung ist dadurch charakterisiert, dass Anoden- und Kathodenraum voneinander getrennt liegen, um die Bildung von Chlorknallgas (1) bzw. Natriumhypochlorit (2) zu verhindern³²:



Zunächst diente die Chloralkalielektrolyse hauptsächlich zur Produktion von Natronlauge, die Ende des 19. Jahrhunderts eine große Nachfrage verzeichnete. Chlor fiel dabei in großen Mengen als Abfallprodukt an. Die Produktionsstätten konnten mit den großen Mengen umweltschädlichen Chlor nichts anfangen. Aus diesem Grund

³¹ Vgl.: Runget, Franz: „Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe“, S.495

³² Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.28

wurden sogar Wettbewerbe ausgeschrieben, bei denen Prozesse zur Verwertung von Chlor gefunden werden sollten.

Die PVC-Produktion kam somit der Industrie sehr gelegen. Heute steht bei der Chloralkalielektrolyse die Produktion von Chlor für u.a. PVC im Vordergrund, die Natronlauge ist eher Nebenprodukt. Im Laufe der Jahrzehnte wurden immer bessere Verfahren der Chloralkalielektrolyse entwickelt. Diese unterscheiden sich in der Art der Trennung des Anoden- und Kathodenraums.

Das älteste, bis heute noch verwendete Verfahren, ist das **Amalgam-Verfahren**:

Beim Amalgam-, oder auch Quecksilberverfahren genannt, werden Anoden- und Kathodenvorgang in getrennten Zellen durchgeführt. Als Anode dient eine Graphit-Elektrode, an der sich Chlor bildet:



In moderneren Apparaturen wird eine formstabile, sogenannte „aktivierte“, Titan-Elektrode verwendet. Sie zeichnet sich durch eine längere Lebensdauer aus.

Als Kathode wird eine Quecksilber-Elektrode verwendet. Wegen der hohen Wasserstoff-Überspannung an Quecksilber bildet sich hierbei kein Wasserstoff-Gas, sondern Natrium-Ionen werden zum Natrium-Metall reduziert, das sich als Natrium-Amalgam, einer Quecksilberlegierung, in der Kathode löst³³:

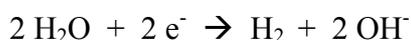


Das Amalgam wird mit Wasser unter Bildung von Natronlauge und elementarem Wasserstoff zersetzt:



Mit dem Quecksilber-Verfahren erhält man sehr reine chloridfreie Natronlauge. Die erste industriell verwendbare Quecksilber-Zelle wurde 1892 von H.Y.Cartner entwickelt. Moderne Großanlagen besitzen Zellgrößen von 35m² und können 300.000 Tonnen pro Jahr (jato) Chlor produzieren³⁴. Während in Europa das Amalgam-Verfahren noch häufig angewendet wird, produziert man in den USA und Japan hauptsächlich nach dem **Diaphragma-Verfahren**:

Als Anode dient, wie beim Amalgam-Verfahren, eine Graphitelektrode, an der sich Cl₂ bildet. Als Kathode fungiert eine Eisenelektrode, an der folgender Vorgang stattfindet:



³³ Riedel, Erwin: „Anorganische Chemie“, S.368

³⁴ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Chloralkalielektrolyse

Der Anodenraum wird vom Kathodenraum durch ein Diaphragma getrennt. Beim Diaphragma handelt es sich um eine poröse, ionendurchlässige Scheidewand aus Asbest. Es handelt sich um ein sehr langlebiges Diaphragma. Das Asbest tritt bei der Chloralkalielektrolyse nicht in die Umwelt aus. Erst bei der Entsorgung kann es zur Belastung der Umwelt durch Asbest kommen.

Zunehmende Bedeutung gewinnt in den modernen Industriestaaten das **Membranverfahren**. Beim Membranverfahren laufen die gleichen Prozesse wie beim Diaphragma-Verfahren ab. Kathoden- und Anodenraum sind jedoch durch eine ionenselektive Membran getrennt. Sie soll eine hohe Durchlässigkeit für Natrium-Ionen und keine Durchlässigkeit für Chlorid- oder Hydroxid-Ionen besitzen. Die Membran besteht aus polymeren fluorierten Kohlenwasserstoffen mit Seitenketten, die Sulfonsäure- bzw. Carboxylgruppen enthalten. Die Natrium-Ionen treten vom Anodenraum durch die Membran in den Kathodenraum. Das Membranverfahren liefert eine chloridfreie Natronlauge mit einem Massenanteil von ca. 35%³⁵.

Es weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber den vorher genannten auf: Vor allem vor dem Hintergrund der besseren Ökobilanz (siehe Punkt 4.2.2.) ist dieses Verfahren den beiden anderen überlegen und setzt sich auch aufgrund verbesserter Technik immer weiter durch.

2.4.2. Polymerisationschemie

Das Monomer VC zeichnet sich durch unangenehme Eigenschaften aus. Der Siedepunkt liegt bei -14°C unter Normalbedingungen. Bei erhöhter Exposition kann es eine spezielle Art von Leberkrebs hervorrufen (siehe Punkt 4.1.1.2.). Erst durch die Polymerisation des Monomers erhält man ein gefahrloses, handhabbares Produkt.

Als Polymerisation bezeichnet man die Überführung einer niedermolekularen in eine hochmolekulare Verbindung³⁶, worunter langkettige Strukturen zu verstehen sind. Die Polymerisation beruht auf ungesättigten reaktiven Zentren eines Kohlenwasserstoff-Monomers. Diese müssen durch einen Katalysator bzw. Initiator aktiviert werden und verbinden sich daraufhin mit weiteren Monomeren zu Dimeren, Trimeren, Oligomeren und schließlich Polymeren. Ein solcher Polymerisations-Initiator kann ein Anion, Kation, ein Radikal oder ein Übergangsmetall sein³⁷. Die

³⁵ Vgl.: Riedel, Erwin: „Anorganische Chemie“, S.368ff

³⁶ Vollhart: „Organische Chemie“, S.532

³⁷ Vollhart: „Organische Chemie“, S.534

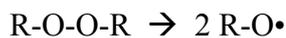
Polymerisation von VC wird hauptsächlich als radikalischer Kettenmechanismus praktiziert, der aus folgenden grundlegenden Stufen besteht:

- Startreaktion des Radikalbildners
- Kettenstart
- Kettenwachstum
- Kettenabbruch

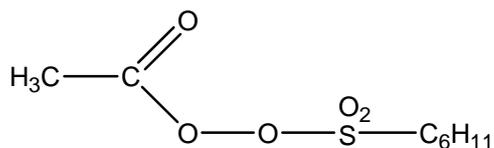
Der Polymerisationsvorgang von VC ist stark exotherm und es können Reaktionsenthalpien von -1500 bis -1700 kJ/kg PVC frei werden. Dabei wird von dem Übergang von VC flüssig zu PVC fest ausgegangen³⁸.

Startreaktion des Radikalbildners

Radikalbildner für die VC-Polymerisation sind vor allem organische Peroxide und Redox-Systeme. Organische Peroxide zerfallen durch Zufuhr von thermischer Energie oder photochemisch in freie Radikale:



Ein Beispiel für einen solchen Initiator ist das Acetylcyclohexansulfonylperoxid³⁹.

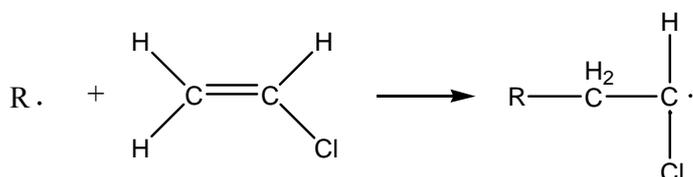


Ein Beispiel für die Radikalbildung durch Redoxsysteme ist die Reaktion von Wasserstoffperoxid mit Eisen-II-Ionen:



Kettenstart

In Gegenwart eines Radikalbildners wird die π -Bindung der Doppelbindung im VC unter Bildung eines Radikals leicht gespalten:



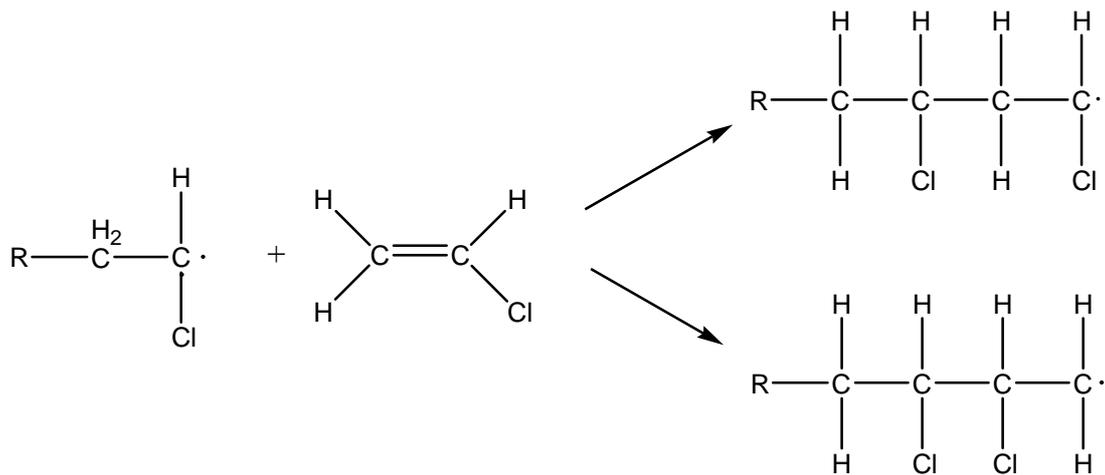
Kettenwachstum

Das neu entstandene VC-Radikal kann nun ein weiteres monomeres VC angreifen und somit eine Kette bilden. Grundsätzlich sind dabei zwei Reaktionswege möglich⁴⁰:

³⁸ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.39

³⁹ Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.40

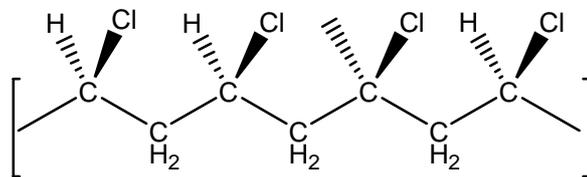
⁴⁰ <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyvinylchlorid.htm>



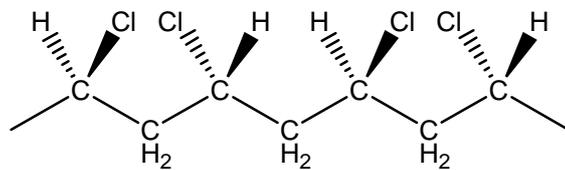
Jedoch zeigt sich experimentell, dass hauptsächlich der erste Weg eintritt. Man nennt dies eine Kopf-Schwanz-Knüpfung. Es lassen sich dafür zwei Gründe anführen. Zum einen sterische Gründe: Das Chlor-Atom ist um ein vielfaches größer als das H-Atom und daher würden sich zwei Chloratome direkt nebeneinander behindern. Zum anderen kann das Chlor-Atom durch seinen $-I$ -Effekt das Radikalzentrum besser stabilisieren⁴¹.

Die Kette kann zudem unterschiedliche **Konfigurationen**, aufgrund der freien Drehbarkeit der Einfachbindung während des Polymerisationsprozesses, annehmen.

Zum einen die Isotaktische:



Zum anderen die Syndiotaktische:

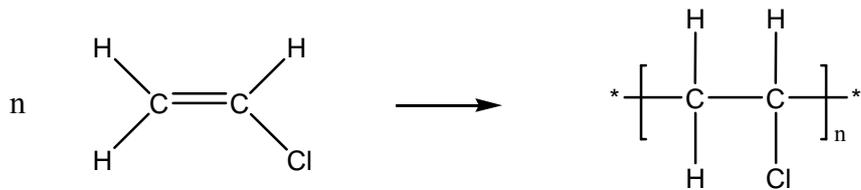


Bei der PVC-Polymerisation kommen beide Strukturen vor. Die Konfiguration wechselt statistisch und man spricht dabei von einer ataktischen Konfiguration⁴². Grundsätzlich kann jedoch gesagt werden, dass mit sinkender Reaktionstemperatur die syndiotaktische Form begünstigt wird.

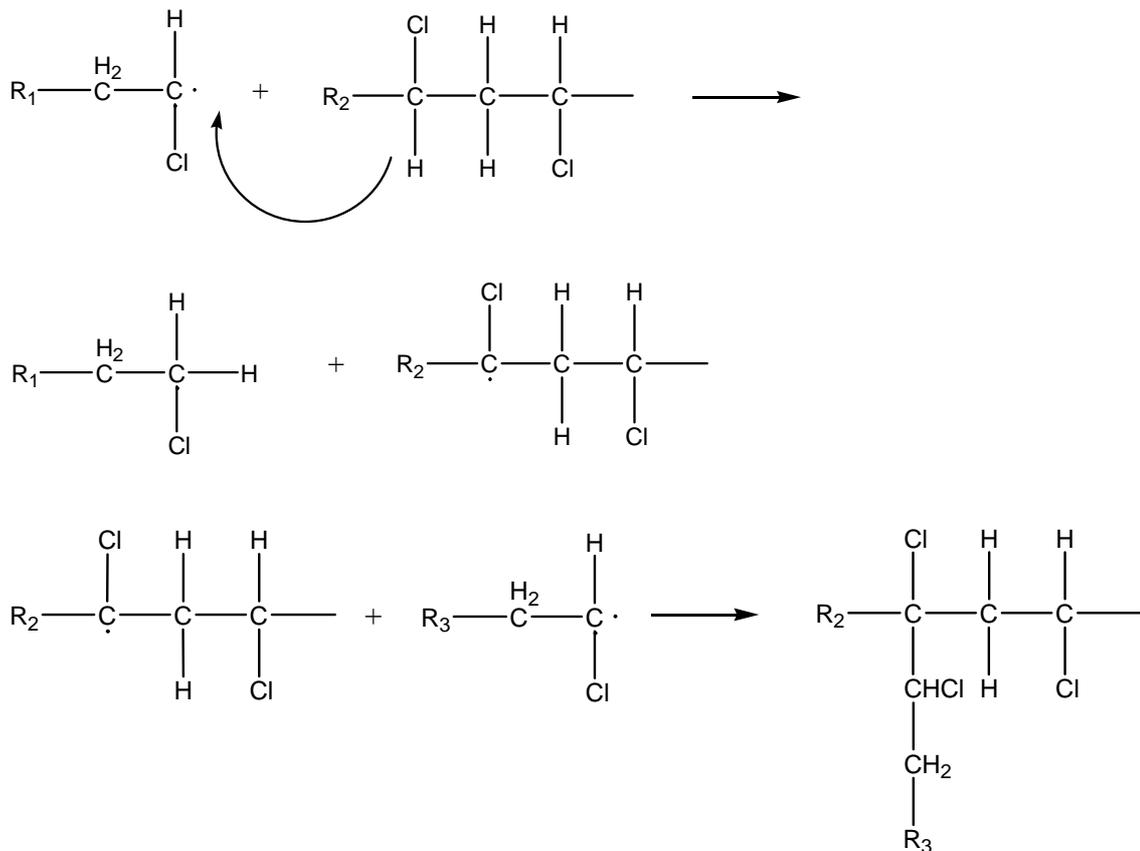
Als Gesamtgleichung kann man schreiben:

⁴¹ Vgl.: www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyvinylchlorid.htm

⁴² Vgl.: Vollhart: „Organische Chemie“, S.538



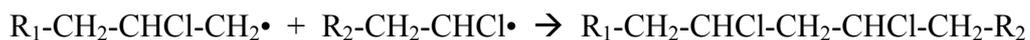
Die Polymerisation wird bei Temperaturen zwischen 40-80°C und Drücken von 6-14bar durchgeführt. Bei einer Kettenübertragung bilden sich Radikale aus, durch deren Angriff an anderen Molekülketten auch Verzweigungsprodukte entstehen können⁴³:



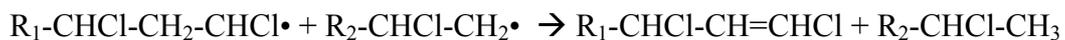
Kettenabbruch

Der Kettenabbruch kann auf zwei verschiedene Arten stattfinden.

Zum einen durch Kombination zweier Radikale:



Oder durch Disproportionierung:



Die Polymerisationsgeschwindigkeit geht bei hohen Umsätzen zurück, und der Polymerisationsvorgang endet schließlich selbstständig.

⁴³ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.41

2.4.3. Technische Verfahren

Die technische Umsetzung der Polymerisation wurde im Wesentlichen in den 30er Jahren entwickelt und erfolgt hauptsächlich über drei Verfahren: Masse-, Suspensions- und Emulsionsverfahren. Die Suspensions-Polymerisation hat sich dabei weitgehend durchgesetzt und nimmt ca. 80% der welt- bzw. deutschlandweiten PVC-Produktion ein⁴⁴. Das Emulsions- und Masse-Verfahren hält sich mit jeweils ca. 10% die Waage (weltweit 8% Masse, in Deutschland 11% Masse). Alle drei Verfahren bedienen sich hauptsächlich des radikalisch initiierten Mechanismus, jedoch ist auch eine anionische Polymerisation möglich (z.B. mit Butyllithium). Weitere mögliche Verfahren sind die Lösungs- und Mikrosuspensionspolymerisation. Ihnen kommt jedoch keine große Bedeutung am weltweiten PVC-Markt zu, wobei ihre Anteile aber langsam zunehmen. Im Folgenden sollen nur die drei wichtigsten Verfahren beschrieben werden.

Bei der Polymerisation sind streng definierte Bedingungen aufgrund der problematischen Reaktion einzuhalten⁴⁵:

1. Die Polymerisation ist stark exotherm. Es werden dabei Reaktionsenthalpien von 1600 kJ/kg PVC gemessen. Diese Reaktionswärme muss abgeführt werden.
2. Die thermische Zersetzung von PVC setzt bei über 80°C ein. D.h. die technischen Herstellungsverfahren dürfen diese Temperatur nicht überschreiten. Anwendungstechnisch wichtige Molmassen erhält man in einem Temperaturintervall von 40-70°C und Drücken von 6-14bar.
3. PVC ist in VC unlöslich, jedoch lösen sich erhebliche Mengen VC in PVC. Dies ist sowohl für das Herstellungsverfahren selbst, wie auch für die weitere Verarbeitung von großer Bedeutung. Bevor das Polymerisationsprodukt in die Betriebe zur weiteren Verarbeitung, wie z.B. zu Werkstoffen, gebracht wird, bedarf es daher einer Aufarbeitung durch Trocknung und Entmonomerisierung.

Die Massepolymerisation

Die Massepolymerisation, auch Block- bzw. Substanzpolymerisation⁴⁶ genannt, unterscheidet sich deutlich von den übrigen Verfahren. Sie zeichnet sich zunächst durch die Abwesenheit von Lösungs- bzw. Verdünnungsmitteln aus. Der Prozess

⁴⁴ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Suspension

⁴⁵ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.59

⁴⁶ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Massepolymerisation

vollzieht sich also in reiner unverdünnter flüssiger Monomerphase. Sie erscheint daher auf den ersten Blick ökonomisch sehr günstig und erzielt auch hohe Raum-Zeit-Ausbeuten. Die technische Konzeption ist auch tatsächlich am einfachsten. Jedoch ist der Prozess in der Praxis schwer beherrschbar, da sich vor allem die Abführung der Polymerisationswärme als sehr schwierig gestaltet⁴⁷.

Technisch verwendet man daher ein diskontinuierliches zweistufiges Verfahren mit einer Vor- und Nachpolymerisation. Das reine Monomer wird bei 50-70°C in einem großen Kessel unter Druck gerührt und ein monomerlöslicher Radikalbildner oder Licht-Strahlung dienen als Initiator der Kettenreaktion. Das feste PVC fällt im Verlauf der Polymerisation im Monomer aus. Es handelt sich also um eine Quasi-Fällungspolymerisation⁴⁸. Bereits bei 30-50% Umsatz entsteht ein trockenes festes Pulver, da das übrige monomere VC an PVC adsorbiert worden ist.

Suspensionspolymerisation

Bei der Suspensionspolymerisation wird das wasserunlösliche Monomer VC, das als diskontinuierliche Phase in Form von Tröpfchen vorliegt, in Wasser durch Rühren möglichst fein verteilt. Man verwendet dabei die 1-4-fache Menge Wasser als Verdünnungsmittel. Die Suspension ermöglicht eine gute Rührfähigkeit⁴⁹ und daher eine einfache Abfuhr der Reaktionswärme.

Man befüllt einen von Luft befreiten, unter Druck stehenden Reaktor mit dem Monomer und Wasser im gewünschten Verhältnis, gibt einen im Monomer löslichen Initiator und zudem noch Schutzkolloide (z.B. Gelatine) hinzu. Diese halten die Tröpfchen separiert und verhindern somit eine Agglomeration. Die Schutzkolloide, oder auch „Dispergatoren“ genannt, werden nur zu 0,1-1Gewicht% bezogen auf das Wasser zugesetzt und liefern als Produkt kleine Polymerperlen. Diese sind als Feststoff sehr gut handhabbar. Daher wird dieses Verfahren auch als Perlpolymerisation bezeichnet. Gearbeitet wird bei Temperaturen von 50-70°C und Drücken von 8-12bar. Nach 4-12 Stunden (je nach Initiator) sind ca. 70% umgesetzt. Man bricht die Polymerisation bei ca. 80% ab. Der Rest VC ist im PVC gebunden und reagiert daher nicht weiter. Aus diesem Grund ist eine nachgeschobene Bearbeitung des Roh-PVC, insbesondere Entgasung und Trocknung, notwendig. Bei der Entgasung wird das überschüssige VC mit Luft aus dem Produkt getrieben und in den nächsten Polymerisationsansatz geleitet.

⁴⁷ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.43

⁴⁸ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Massepolymerisation

⁴⁹ Vgl.: Runget, Franz: „Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe“, S495

Der Nachteil des Verfahrens liegt darin, dass die Zusätze schwierig abzutrennen sind.

Emulsionspolymerisation

Das Emulsions-Verfahren existiert seit 1940 und zeichnet sich durch schonende Rührbedingungen und die Zugabe eines Emulgators aus. Man verwendet dabei etwa die 1-2-fache Volumenmenge einer wässrigen Emulgatorlösung. Die wasserunlöslichen Monomere werden mit Hilfe der Emulgatoren in Wasser emulgiert, wobei sich Monomertröpfchengrößen von 0,5-10 µm ergeben. Diese sind von einer „Emulgatorhaut“ umgeben und somit wird das Zusammenfließen der Tröpfchen verhindert. Man spricht von sogenannten „Emulgatormicellen“. Auch das entstehende Polymer bleibt zunächst emulgiert⁵⁰.

Als Zusätze werden wasserlösliche Initiatoren und Puffersubstanzen hinzugegeben und die Emulsion wird bei relativ niedriger Temperatur und dem Sättigungsdampfdruck von VC langsam verrührt. Dabei bildet sich eine milchartige Emulsion. Die Kühlung geschieht, wie bei der Suspensionspolymerisation auch, über Kühlmäntel und Kühlelemente, die um den Reaktionskessel angebracht sind. Auch bei diesem Verfahren lässt sich die Reaktionswärme aufgrund der Emulgator-Phase besonders gut abführen.

Man erhält als Produkt besonders feine PVC-Partikel, aus denen gut Pasten⁵¹ hergestellt werden können.

Die Trocknung und Entgasung geschieht ähnlich wie beim Suspensions-Verfahren. Der Prozess kann sowohl kontinuierlich, als auch diskontinuierlich durchgeführt werden, wobei der diskontinuierliche Prozess besser steuerbar ist.

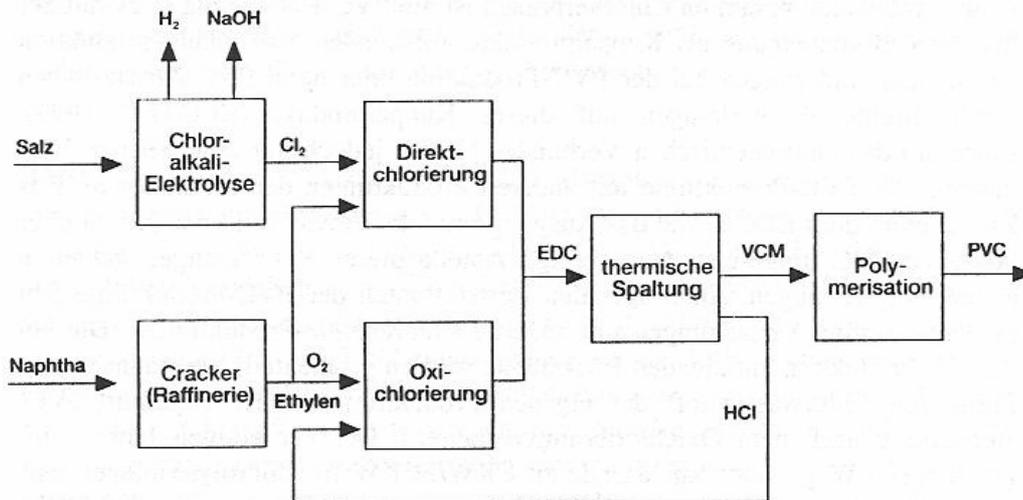
Der prinzipielle Unterschied zwischen der Suspensions- und Emulsions-Polymerisation besteht darin, dass nach dem Suspensions-Verfahren die Polymerisation in VC-Tröpfchen und nach dem Emulsions-Verfahren in den Micellen verläuft.

2.4.4. Schema der PVC-Herstellung

Der Prozess der PVC-Herstellung lässt sich vereinfacht in folgendem Schema darstellen:

⁵⁰ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.164

⁵¹ Tötsch, Walter (Hrsg.): „Polyvinylchlorid-Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes“, S.27



Erklärungen: EDC=Ethylendichlorid, VCM=Vinylchlorid-Monomer

Aus: Pohle, Horst: PVC und Umwelt

2.5. Eigenschaften von PVC

Das Rohprodukt, das man bei der Polymerisation von VC erhält, ist noch kein gebrauchsfähiger Kunststoff. Im Gegenteil:

Es handelt sich um ein sprödes, thermisch instabiles Material, das schlecht weiter zu verarbeiten ist und schlechte Gebrauchseigenschaften besitzt. Roh-PVC ist ein Thermoplast, der großenteils amorph⁵² ist, aber auch kristalline Bereiche besitzt. Je nach Polymerisations-Verfahren variiert dieser Anteil. Die Polymere sind also nicht streng linear angeordnet. PVC besitzt 3-20 Seitenketten pro 1000 C-Atomen. Jedoch kommen nur kurzkettenige Verzweigungen vor. Bei der Polymerisation werden K-Werte⁵³ von 45-80 und Molmassen von 30.000 bis 130.000 erreicht⁵⁴. PVC ist unter Normalbedingungen hornartig und hat eine Dichte von 1,38g/cm³. Es ist thermisch nur bis 100°C stabil und zersetzt sich oberhalb dieser Temperatur. Bei einem Brand schmort es vor sich hin und verlischt selbstständig, sobald die Feuerquelle entfernt wird. Es ist beständig gegen Säuren, Laugen, Öle und Alkohole und resistent gegen Bakterien⁵⁵. Das Roh-Produkt PVC ist für Mensch und Umwelt unbedenklich.

Die beschriebenen Eigenschaften lassen sich mit der Molekülstruktur erklären:

Die einzelnen PVC-Ketten sind nicht bzw. nur wenig chemisch miteinander vernetzt. Sie lagern sich aufgrund von physikalischen zwischenmolekularen Kräften aneinander. Diese Kräfte beruhen auf den Dipol-Anziehungen zwischen dem partiell

⁵² amorph = ähnlich einer unterkühlten Schmelze, im Fernordnungsbereich keine geordnete Struktur

⁵³ K-Wert = Eigenviskosität, zur Charakterisierung des MG bei Polymeren

⁵⁴ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Polyvinylchlorid

⁵⁵ Vgl.: Wagner, Fem.: „Kunststoffe in der Praxis“, S.60

negativ geladenem Chlor und dem partiell positiv geladenem C-Atom⁵⁶. Die polare C-Cl-Bindung lässt sich mit der Elektronegativitäts-Differenz (ΔEN) von Kohlenstoff und Chlor erklären⁵⁷. Das Chlor-Atom ist auch für einen weiteren Effekt verantwortlich: Chlor ist ein sehr großes Atom im Vergleich zu Kohlenstoff und Wasserstoff. Daher wirkt es zwischen den Ketten eher sperrig, sodass sich diese schlecht aneinander vorbeischieben lassen. Damit lässt sich die Sprödigkeit des Roh-PVC erklären. Bei Wärmezufuhr kommt es zur Schwächung der zwischenmolekularen Kräfte. Damit verringert sich der Abstand zwischen den Ketten, sodass sich diese besser gegeneinander verschieben lassen.

Roh-PVC zeichnet sich also durch verschiedene positive und negative Eigenschaften bei Verarbeitung und Verwendung aus. Die positiven Eigenschaften möchte man soweit wie möglich beibehalten, die negativen Eigenschaften lassen sich durch geeignete Zusätze weitgehend beseitigen. Daher wird Roh-PVC mit einer ganzen Reihe von Zusätzen versehen, die auch als „Additive“ bezeichnet werden.

Um das spröde, instabile Roh-Material z.B. wärme- und witterungsbeständig zu machen, benötigt man sogenannte Stabilisatoren. Erst nach deren Zusatz lässt sich PVC gut schmelzen und formen. Man kann dem PVC durch geeignete Additive aber auch völlig neue Eigenschaften zukommen lassen: So erhält man z.B. durch Zusatz von sogenannten Weichmachern einen form- und knetbaren weichen Kunststoff. Je nach zugegebener Weichmacher-Art bzw. -Menge lässt sich wiederum eine Vielzahl möglicher Stufen von Weichheit erzeugen. Um die Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten wenigstens grob zu gliedern, unterscheidet man nach Hart- (ohne Weichmacher) und Weich-PVC⁵⁸.

2.5.1. Verfahrenstechniken

Wie bereits angedeutet bieten die unterschiedlichen Polymerisations-Verfahren die Möglichkeit, die Eigenschaften des Produkts zu beeinflussen. Mögliche Faktoren, die bei dem Polymerisationsprozess eine Rolle spielen, sind Druck, Temperatur, Initiator und auch die Rührgeschwindigkeit. So werden beim Emulsions-Verfahren von vornherein milde Rührbedingungen eingestellt, die auch Auswirkungen auf das spätere Produkt haben. Man hat dabei unter anderem Einfluss auf die Größe, Dichte

⁵⁶ Vgl.: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyvinylchlorid.htm>

⁵⁷ $\Delta EN = 0,3$; es handelt sich somit um eine leicht polare Bindung

⁵⁸ Vgl.: Wagner, Fem.: „Kunststoffe in der Praxis“, S.60

und Porosität des Korn⁵⁹. So lassen sich unterschiedlich viele Verzweigungen zwischen den einzelnen Polymerketten und unterschiedliche Taktizitäten⁶⁰ hervorrufen, die für die Variation der kristallinen Bereiche verantwortlich sind. Es lassen sich beispielsweise kristalline Anteile zwischen 5-30% erzeugen⁶¹.

Zudem setzt man je nach Verfahren unterschiedliche Lösemittel bzw. Zusätze ein:

Beim Suspensions-Verfahren: Dispergatoren; beim Emulsions-Verfahren: Emulgatoren. Auch bei den einzelnen Verfahren selbst besteht eine Vielzahl an möglichen Variationen von Zusätzen, die jeweils Auswirkungen auf die Eigenschaften des Produkts zeigen:

Bei der Suspensions-Polymerisation kann man beispielsweise Polyvinylalkohol als Dispergator einsetzen und erhält dadurch ein sehr kompaktes Korn. Eine Mischung aus Methylcellulose und Celluloseether⁶² hingegen liefert ein halbporöses Korn, dagegen ein Gemisch aus Bariumchlorid, Natrium-Laurylsulfat und Methocel ein hochporöses Korn⁶³. Beim Emulsions-Verfahren sind die Prozess-Bedingungen so gewählt, dass man ein Produkt erhält, das gut zu Pasten weiterverarbeitet werden kann.

Sowohl über die Herstellungsverfahren selbst, als auch über die gewählten Lösemittel bzw. Zusätze, lassen sich also gewünschte Eigenschaften für das endgültige Produkt bestimmen.

2.5.2. Einführung der Additive

Sehr viel bedeutsamer sind jedoch die Additive, die man dem Roh-PVC beimischt und somit eine Vielzahl neuer Eigenschaften erreichen kann. So sind z.B. die Stabilisatoren sehr wichtig, da ohne sie eine vernünftige Weiterverarbeitung von PVC überhaupt nicht möglich ist. An dieser Stelle sollen zunächst nur Einsatz, Wirkungsweise, Eigenschaften und wirtschaftliche Aspekte der Additive betrachtet werden. Die ökologischen und toxikologischen Effekte werden in Kapitel 4. beschrieben.

⁵⁹ Runget, Franz: „Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe“, S.497

⁶⁰ Die Taktizität lässt sich über Abkühl- und Temperaturbedingungen bei der Herstellung beeinflussen.

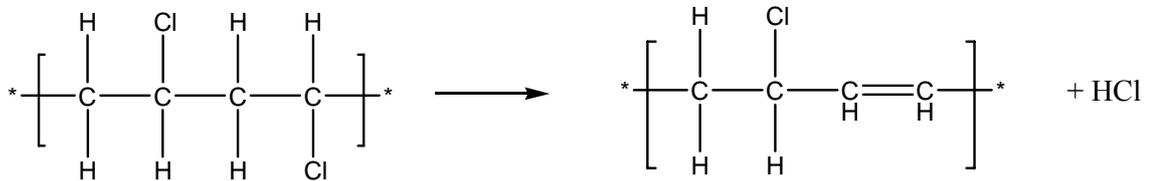
⁶¹ Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.318ff

⁶² Gemisch aus Methylcellulose und Celluloseether = Methocel® der Firma Dow

⁶³ Vgl.: Runget, Franz: „Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe“, S.497

2.5.2.1. Stabilisatoren

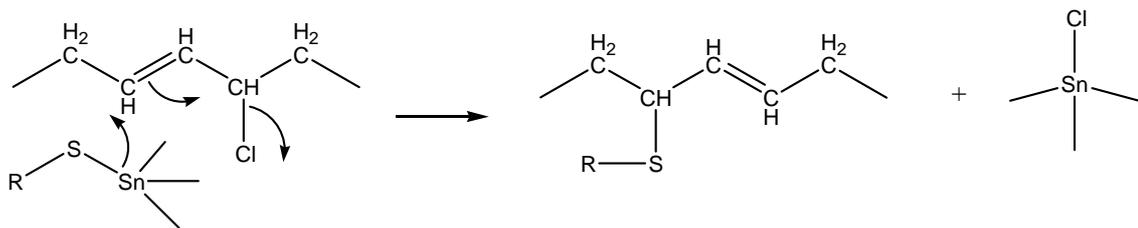
Reines PVC ist thermisch instabil. Bei der thermischen Zersetzung wird nicht das monomere VC zurückgebildet, sondern es wird HCl unter Bildung einer Doppelbindung abgespalten.



Liegen in der PVC-Kette Abweichungen von der „idealen“ Struktur vor, wird eine HCl-Abspaltung zusätzlich begünstigt. So bewirkt eine C=C-Doppelbindung eine Allyllaktivierung, die wiederum die HCl-Abspaltung fördert⁶⁴. Der Start der Zersetzung kann durch Einwirkung von Licht (Photolyse) initiiert bzw. beschleunigt werden. Bei Roh-PVC setzt die Abbaureaktion des Produkts bereits bei Temperaturen von 100-120°C ein. Die Weiterverarbeitung kann jedoch erst bei 160-200°C gut durchgeführt werden. Die Lösung dieses Problems erreicht man durch den Einsatz von sogenannten Wärme-Stabilisatoren. Diese verhindern einen verfrühten Abbau und ermöglichen somit auch eine gute Verarbeitung bei Temperaturen von 160-200°C. Sie sind nicht nur technisch enorm wichtig, sondern stellen auch einen großen wirtschaftlichen Faktor dar. Allein im Jahr 1980 wurden weltweit 200.000 Tonnen verwertet. Die Produktion ist seitdem weiter angestiegen.

Die Wirkung der Stabilisatoren beruht auf verschiedenen Effekten⁶⁵:

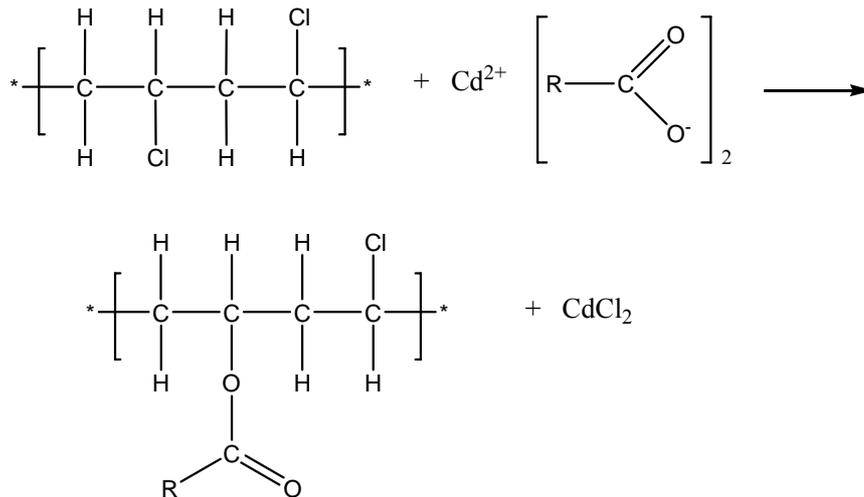
Zum einen werden Initialstellen durch Substitution ausgeschaltet:



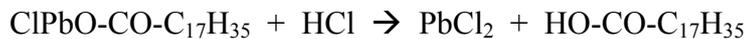
Zum anderen besteht die Möglichkeit die Chlor-Atome durch größere Carboxylat-Reste zu ersetzen. Diese verhindern ein Aufbrechen der Struktur:

⁶⁴ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.46

⁶⁵ Vgl.: Felger, Hans: „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S519ff



Außerdem kann durch die Bindung von HCl der weitere Zerfall der PVC-Matrix verhindert werden (Beispiel eines Pb-Stabilisators):



Die folgende Aufzählung soll einen Einblick in die Vielzahl der möglichen Stabilisator-Typen geben:

- Organozinmercaptide und –sulfide, Organozinncarboxylate
- Metallsalze von langkettigen Carbonsäuren (Ba/Cd, Ba/Zn, Ca/Zn)
- Bleisulfat, Bleiphosphit, Bleiphthalat, Bleistearat, Bleicarbonat
- β -Aminocrotonsäureester, 2-Phenylindole, Harnstoffderivate
- Organische Phosphite, Epoxyverbindungen, Polyole⁶⁶

An dieser Stelle sollen nur die bedeutensten Stabilisatoren genauer betrachtet werden. Die **Organozinn-Verbindungen** können alle oben genannten Schutzfunktionen übernehmen. Dabei sind die komplexchemischen Eigenschaften des Stoffes hauptsächlich verantwortlich. Die **Ba/Cd-Stabilisatoren** beruhen auf der Wirkung ihrer carbonsauren Salze. Es sind typische Salze von Fettsäuren mit 8-20 C-Atomen, wobei die Kationen Barium und Cadmium in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen zugesetzt werden. Die **Ca/Zn-Systeme** funktionieren ähnlich wie die Ba/Cd-Systeme und sind genauso wirksam. Dabei sind die Ca/Zn-Systeme jedoch weniger umweltgefährlich als jene mit Cadmium. Die **Pb-Systeme** gehören zu den ältesten Wärme-Stabilisatoren für PVC. Wichtig sind auch hier die komplexchemischen Eigenschaften. Die labilen Cl-Atome werden substituiert und HCl wird als stabiles Produkt PbCl₂ abgefangen.

⁶⁶ Vgl.: Felger, Hans: „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.527ff

Die Wirkung der Stabilisatoren ist dabei auch immer abhängig von den übrigen Additiven. Daher ist auf eine gut abgestimmte Mischung zu achten.

2.5.2.2. Gleitmittel

Gleitmittel beeinflussen zum einen die Zähflüssigkeit der PVC-Schmelze bei der Verarbeitung, indem sie die Viskosität herabsetzen, zum anderen wirken sie als „Schmiermittel“ zwischen der PVC-Masse und der Maschinenoberfläche und verhindern somit ein Ankleben oder Anhaften⁶⁷.

Sie besitzen für Weich-PVC keine Bedeutung, da durch Weichmacher die gewünschten Verarbeitungseigenschaften bereits erreicht werden. Gleitmittel sind aber für Hart-PVC wichtig, um das spröde Roh-Material für die Verarbeitung geschmeidiger zu machen. Die Gleitwirkung wird erreicht durch organische, teils polare Molekülketten, die zwischen den PVC-Partikeln wirksam werden. Somit wird eine Verformung schon bei relativ niedrigen Temperaturen möglich. Sie reduzieren also die Erweichungstemperatur. Auf der anderen Seite tritt ein materialschonender sogenannter „Kugellagereffekt“ ein.

Man unterscheidet zwischen inneren und äußeren Gleitmitteln⁶⁸. Die Äußeren zeigen Wirkung an den Grenzphasen PVC/Stahl beim Verarbeitungsprozess. Die Inneren sorgen für eine verbesserte Fließfähigkeit in der Schmelze. Sie besitzen eine hohe Affinität zu PVC und benetzen das Korn nicht nur von außen, sondern dringen auch in dieses ein. Die Gleitmittel bestehen üblicherweise aus Kohlenwasserstoffketten mit mindestens 12 C-Atomen⁶⁹ und einer polaren Gruppe wie beispielsweise bei Alkoholen oder Wachsen.

Man unterscheidet Gleitmittel mit nur einer polaren Gruppe und mehreren polaren Gruppen wie z.B. Sojaöl oder Glycerin. Die meisten Gleitmittel werden aus natürlichen Rohstoffen gewonnen. Die beste Wirkung wird bei einem regelmäßigen Aufbau erzielt.

Die Gleitmittel werden bis zu einem Anteil von 3% zugesetzt. Eines der ersten verwendeten Gleitmittel war der Montansäureester. Er wurde ab Mitte der 30er Jahre eingesetzt.

⁶⁷ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.72

⁶⁸ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.571ff

⁶⁹ Bis zu 22 C-Atome bei Alkoholen und bis zu 39 C-Atome bei Wachsen.

2.5.2.3. Füllstoffe

Die Füllstoffe sind oft Hauptbestandteil einer PVC-Rezeptur (bis zu 50Gew.%), verändern die grundlegenden Eigenschaften des Produkts jedoch kaum. Sie können dabei mehrere Funktionen erfüllen:

Zum einen mischt man sie bei, um das Volumen oder Gewicht des Kunststoffes zu erhöhen. Damit verbilligt man zugleich das Endprodukt, da man sehr günstige Füllstoffe verwenden kann, die den Grundstoff PVC „ersetzen“. Die Füllstoffe dienen also auch der Sparsamkeit des Endprodukts. Zum anderen kann man durch gezielten Einsatz bestimmter Füllstoffe die technische Verarbeitbarkeit verbessern. Es müssen dann aber sehr reine Produkte verwendet werden, um eine Verschlechterung der PVC-Produkteigenschaften auszuschließen. Die Bindung an den Kunststoff erfolgt über rein physikalische Wechselwirkung zwischen Füllstoff und PVC-Matrix⁷⁰.

Beispiele für typische Füllstoffe sind Ruß, Mehle, Fasern, Quarze, Metalloxide, Calciumcarbonat (CaCO₃), Aluminiumhydroxid (Al(OH)₃) und Bariumsulfat (BaSO₄). Sie können also sowohl organischer als auch anorganischer Natur sein. Der Einfluss bzw. der Verwendungszweck der verschiedenen Füllstoffe kann sehr unterschiedlich aber zugleich auch spezifisch sein. Die folgende Tabelle soll darüber einen Überblick geben:

Einfluss der Füllstoffe auf die Eigenschaften, Tabelle 2.1

Eigenschaften	CaCO ₃	Sand/Quarz	Metalloxide	Ruß
Druckfestigkeit	+	+		
Schlagzähigkeit	+/-	-	-	+
Reduzierte thermische Ausdehnung		+	+	
Reduzierte Schrumpfung	+	+	+	+
Bessere Wärmeleitfähigkeit	+	+		+
Elektrische Leitfähigkeit				+
Elektrischer Widerstand			+	
Wärmebeständigkeit		+	+	+
Verbilligung	++	+	++	+

++ = starke Wirkung, + = schwächere Wirkung, - = negative Wirkung

aus: Felger, Hans: „Kunststoffhandbuch 2/1 Polyvinylchlorid“

2.5.2.4. Flammenschutzmittel

Flammenschutzmittel sollen zum einen die Zünd-Temperatur von Kunststoffen erhöhen, zum anderen die Brenngeschwindigkeit verlangsamen und dadurch die Flammausbreitung vermindern. Dabei wirken vor allem halogenartige Verbindungen

⁷⁰ Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.68

flammschützend, die über einen Radikalkettenmechanismus reagieren. Die Wirkung beruht darauf, dass die Halogene in Radikale zerfallen und die bei der Verbrennung entstehenden Radikale abfangen. Sie bewirken also die Kettenabbruchsreaktion. PVC selbst hat durch seinen hohen Chlorgehalt von ca. 57% einen effektiven, inhärenten Flammschutz.

Da PVC selbst schwer brennbar ist, teilweise sogar selbstverlöschend, stellt sich die Frage, warum überhaupt Flammschutzmittel eingesetzt werden. Dabei müssen die anderen Additive betrachtet werden. Einige davon sind gut brennbar⁷¹. Für kompakte PVC-Produkte ist hingegen kein Flammschutz notwendig.

Der Flammschutz beruht auf unterschiedlichen Effekten: So wird beispielsweise Aluminiumhydroxid (Al(OH)₃) eingesetzt, da es bei Temperaturen über 200°C H₂O in einer endothermen Reaktion abspaltet und somit löschend wirkt:



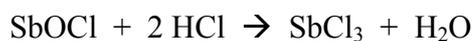
Auch Phosphorverbindungen werden eingesetzt, wobei diese einen anderen Effekt ausnutzen: Beim Verbrennungsvorgang bilden sich aus den Phosphorsalzen polymere glasartige Phosphate. Das Glas verringert die Sauerstoff-Zufuhr, sodass der Verbrennungsvorgang behindert wird.

Bor-Verbindungen zeigen ähnliche Wirkung wie Phosphor:



B₂O₃ ist auch ein Glas, das die Sauerstoff-Zufuhr behindert.

Große Bedeutung hat der Zusatz von Antimonoxid⁷², dem allerdings cancerogene Wirkung nachgewiesen werden konnte. Probleme ergeben sich somit bei der Entsorgung, da das giftige Produkt hier in die Umwelt austreten kann. Der Stoff bedient sich gleich zweier Effekte, die zum Verlöschen beitragen:



Zum einen wird bei dieser Reaktion viel Wasser frei, zum anderen fördert Antimontrichlorid den Kettenabbruch.

Problematisch zu bewerten ist der Einsatz von Chlorparaffinen⁷³. Diese erzielen einen guten Brandschutz aufgrund des hohen Halogenanteils. Der Chlorierungsgrad variiert

⁷¹ Vgl.: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.48

⁷² Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.738ff

⁷³ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.154

zwischen 10 und 75% bei einer Kettenlänge von C10-C30. Jedoch produzieren sie bei einem Brandfall auch vermehrt die als schädlich geltenden Dioxine und Furane (siehe Punkt 4.1.3.).

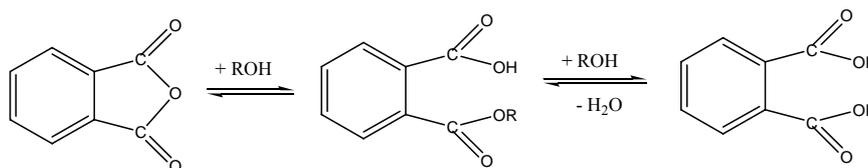
Durch Zusatz von Molybdänoxid wird zusätzlich eine verminderte Rauchentwicklung erreicht.

2.5.2.4. Weichmacher

Eine sehr große Bedeutung für die PVC-Industrie haben die sogenannten Weichmacher. Durch sie erhält das Produkt eine weitere völlig neue Eigenschaft: Das PVC wird weich und ist bei Raumtemperatur formbar. Damit steigt die Vielzahl der Verwendungsmöglichkeiten von PVC um ein Vielfaches an. Sie stellen einen großen wirtschaftlichen Faktor dar: Der Weichmacherverbrauch belief sich z.B. 1999 in Westeuropa auf ca. 1 Million Tonnen, wobei davon 95% Phthalsäureester waren. Einige Weichmacher sind in jüngster Zeit aufgrund ihrer toxikologischen Bedenklichkeit in den Mittelpunkt des Interesses gerückt (siehe Punkt 4.1.2.2.).

Weichmacher werden dem Roh-PVC vor der weiteren Verarbeitung beigemischt. Dabei sind sowohl das zugesetzte Verhältnis als auch der Weichmacher-Typ (Struktur, Größe) variabel, sodass eine hohe Vielfalt an Weich-PVC-Ausprägungen erreichbar ist. „Die Wirkung der Weichmacher beruht darauf, dass der Abstand der PVC-Molekülketten vergrößert wird, damit die Nebervalenzkräfte geschwächt werden und so der Einfrierbereich zu tieferen Temperaturen verschoben wird.“⁷⁴

Der erste industriell eingesetzte Weichmacher war der Campher beim Kunststoff Cellulosenitrat⁷⁵ im Jahr 1855. Als Weichmacher wurden seitdem Organophosphate, Phthalsäurederivate, Adipinsäurederivate, sowie natürliche Polymere und Öle eingesetzt. Letztendlich haben sich die Phthalsäureester (Phthalate) durchgesetzt. Es handelt sich dabei um Diester der Phthalsäure mit mittelkettigen Alkoholen. Bei den meisten Phthalaten handelt es sich unter Normalbedingungen um schwach flüchtige lipophile Flüssigkeiten. Die Herstellung erfolgt über eine Veresterung der Phthalsäure:

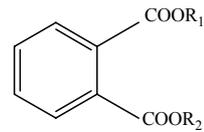


⁷⁴ Klemmer, G./ Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie Wohin? Der Fall PVC“, S.189

⁷⁵ Becke, Joachim: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffchemie“, S.34

Die wichtigsten Phthalate für die PVC-Industrie sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

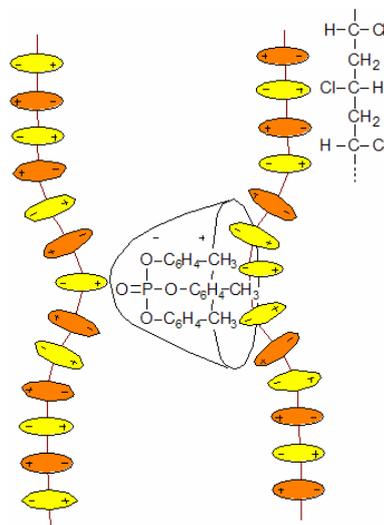
Die Grundeinheit besteht aus dem Baustein:



Abkürzung	Chemische Bezeichnung	Reste
DEHP / DOP	Di-(2-Ehtyl)-hexylphthalat / Dioctylphthalat	$R^1/R^2 =$ $CH_2-CH(C_2H_5)-C_4H_9$
DINP	Diisononylphthalat	$R^1/R^2 = C_9H_{14}$
DBP	Dibutylphthalat	$R^1/R^2 = C_4H_9$
DIDP	Diisodecylphthalat	$R^1/R^2 = C_8H_{17}$
BBP	Butylbenzylphthalat	$R^1 = C_4H_9$ $R^2 =$
DIBP	Diisobutylphthalat	$R^1/R^2 =$
DEP	Diethylphthalat	$R^1/R^2 = C_2H_5$

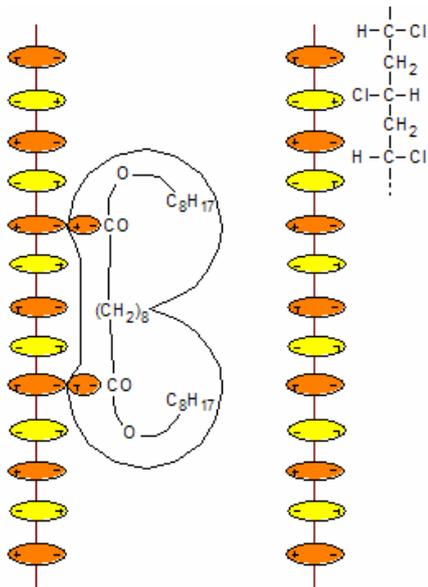
Tabelle 2.2; Aus: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“

Bestimmend für die Wirkung sind die polaren Estergruppen. Diese gehen Wechselwirkungen mit den polaren Anteilen des PVC ein und legen sich somit zwischen die PVC-Ketten. Die Weichmacher können dabei auf zwei verschiedene Weisen wirken: Zum einen durch den Schaniereffekt: Dabei kommt es zur Ausbuchtung innerhalb der PVC-Moleküle. Diese sorgen für eine Verschiebung der Kette. In der Abbildung wird dies anhand eines Organophosphats gezeigt:



aus: „Römpf Chemie Lexikon“

Zum anderen wirken sie durch einen Abschirmeffekt: Dabei werden die Kohäsionskräfte zwischen den Ketten geschwächt und die Ketten werden dadurch besser beweglich. Der behandelte Stoff wird somit weicher, wie dies am Adipinsäureester veranschaulicht wird:



aus: „Römpp Chemie Lexikon“

Da die Bindung der Phthalate über zwischenmolekulare Wechselwirkungen erfolgt, handelt es sich somit nur um eine Einlagerung⁷⁶. Daher können die Weichmacher aus dem Produkt entweichen (Migration).

Die Phthalate liegen bereits ubiquitär⁷⁷ vor. Sie gelangen bei der Produktion und Weiterverarbeitung in die Umwelt, treten durch Migration bei der Verwendung und auch bei der Entsorgung zu einem geringen Anteil aus. Aufgrund des Migrationsprozesses sind einige bedenkliche Weichmacher seit 1989 in Lebensmittelverpackungen verboten und stehen seit 2005 auch auf der Verbotsliste für Kinderspielzeug (siehe Punkt 4.1.2.3.).

Die Weichmacher lassen sich in 2 Gruppen unterscheiden⁷⁸:

a) Die sogenannten **äußeren** Weichmacher besitzen in der Praxis die weitaus größere Bedeutung. Es steht außerdem eine größere Auswahl an Typen zu Verfügung. Die Wirkung beruht darauf, dass die Weichmacher-Moleküle physikalisch über Dipole an das PVC gebunden werden. Daher besteht eine stöchiometrisch begründete Obergrenze für die Aufnahme. Ein Entweichen ist möglich. Es liegt ein ausgeprägtes Solvations-/Desolvations-Gleichgewicht vor.

⁷⁶ Vgl.: Felger, Hans: „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.609

⁷⁷ Klemmer, G./ Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie Wohin? Der Fall PVC“, S.186

⁷⁸ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.609

b) Bei den sogenannten **inneren** Weichmachern sind die Stoffe in die PVC-Molekülkette eingebunden. Ein Beispiel dafür ist das Mischpolymerisat aus VC mit Vinylacetat. Auch hier beruht die Wirkung auf Estergruppen, die sich jedoch innerhalb der polymeren Kette befinden. Der Vorteil dieser Weichmacher-Art ist, dass keine Migration stattfinden kann. Der Nachteil ist ein relativ kompliziertes technisches Herstellungsverfahren und eine sehr schlechte Flexibilität des Produkts bei niedrigen Temperaturen.

2.5.2.5. Farbstoffe

PVC wird, wie alle anderen Kunststoffe auch, mit anorganischen oder organischen Pigmenten sowie mit Farbstoffen gefärbt.

Anorganische Pigmente sind Schwermetallverbindungen. Sie liegen in PVC als feinverteilte Partikel vor, die nicht migrieren. Bei der Abfallbeseitigung bzw. bei der Verbrennung entstehen aber problematische schwermetallhaltige Stäube. Anorganische Pigmente auf Basis von Blei- und Cadmiumverbindungen, mit denen früher brillante Rot- und Gelbtöne gefärbt wurden, sind heute wegen ihres hohen Gefährdungspotentials verboten. Diese Farbtöne hat man durch überwiegend schwermetallfreie organische Pigmente vom Typ Azo, Anthrachinon und Polycyclen ersetzt. Eine Sonderstellung nimmt das Weißpigment Titandioxid (TiO_2) ein, mit dem die Buntpigmente aufgehellt bzw. das ursprünglich transparente PVC abgetrübt wird. Gefärbt wird PVC auch mit metallfreien organischen Farbstoffen, die im PVC gelöst vorliegen. Aus manchen PVC-Typen (mit bestimmten Weichmacher-Gehalt) migrieren diese Farbstoffe bei der Anwendung und können daher für spezielle Zwecke nicht eingesetzt werden.

2.5.2.6. Weitere Additive

Teilweise werden dem PVC auch weitere andere Polymere bis zu 10% hinzugesetzt, um den Stoff besser verarbeiten zu können. Auch mikrobentötende Zusätze wie z.B. Fungizide, sowie Treibmittel und optische Aufheller finden in einigen PVC-Produkten Verwendung. Außerdem kann man auch Biostabilisatoren, Antistatika oder Mittel zur Beeinflussung der Viskosität zusetzen. Jedoch sind deren Wirkung nicht von grundlegender Bedeutung für PVC und werden daher nicht ausführlich behandelt.

Die folgende Tabelle zeigt die möglichen Zusätze in einem Produkt aus Weich-PVC beispielhaft:

Zusatzstoff	Durchschnittlicher Anteil im Fertigprodukt *
Weitverbreitet	
Weichmacher	30%
Füllstoffe	30%
Hilfsstoffe	5%
Farbstoffe	2%
Hitzestabilisatoren	2%
Gleitmittel	0,5%
Speziell	
Flammhemmende Substanzen	4%
Antistatisch wirkende Substanzen	1%
Fließmittel	1%
Schaumbildner	1%
Biostabilisatoren	1%

*) Nicht alle Zusatzstoffe sind in einem gegebenen Produkt enthalten. Die Angaben repräsentieren Mittelwerte. Bereiche können sehr stark streuen. Beispiel Weichmacher: 10-50%
Tabelle 2.3; Aus: Pohle, Horst: PVC und Umwelt

2.5.3. Verarbeitungsverfahren

Das bei der Produktion erhaltene Roh-PVC bzw. das Granulat wird im nächsten Schritt der Produktion weiterverarbeitet, um letztendlich die PVC-Formteile herzustellen. Dabei nutzt man die thermoplastischen Eigenschaften dieses Kunststoffes aus:

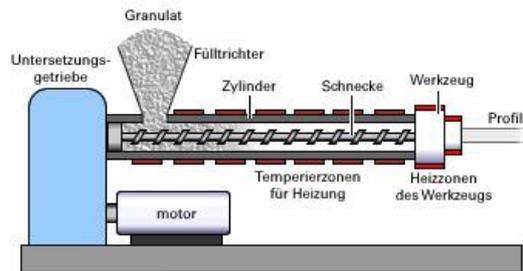
In der Wärme erweicht er und ist damit beliebig verformbar. Beim Abkühlen erstarrt er wieder und behält die ihm angepasste Form bei⁷⁹. Je nachdem welches Endprodukt man schließlich erhalten will, können unterschiedliche Technologien eingesetzt werden. Beim Verarbeitungsvorgang werden dem PVC auch die Additive beigemischt. Man nennt diesen Vorgang auch „Compounding“. Dieser kann auch in einem eigenständigen vorgezogenen Prozess durch Rühren stattfinden. Dabei wird das Rohmaterial zusammen mit den Additiven gemischt, zerkleinert und homogenisiert. Als Produkt erhält man dabei ein Granulat, das zu den

⁷⁹ AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.21

weiterverarbeitenden Vertrieben geliefert wird. Im folgenden sollen die wichtigsten Verarbeitungsmethoden von PVC kurz vorgestellt werden:

Extrusion

Grundsätzlich ist zu jedem Extruder zu sagen, dass er die Aufgabe hat, „den als Granulat oder Pulver angelieferten Rohstoff zu fördern, zu verdichten, dabei zu entgasen bzw. zu entlüften, aufzuschmelzen,



homogen mit den Additiven zu mischen und schließlich über eine Düse in Form zu pressen⁸⁰. Bei dieser Technologie wird das PVC, zusammen mit den Additiven, durch eine beheizte Förderschnecke, dem sogenannten Extruder, unter Druck befördert. Aufgrund der Wärme wird das PVC (Granulat oder Pulver) aufgeschmolzen. Das so plastifizierte Material wird am Ende der Schnecke durch eine bestimmte Düse gepresst. Dort wird dem PVC, je nach Düsen-Aufsatz, eine bestimmte Form gegeben und das Produkt wird abgekühlt. Das Verfahren kann kontinuierlich betrieben werden. Produkt-Beispiele für diese Technologie sind PVC-Rohre, -Fenster oder -Stäbe. Das Endprodukt wird durch Zuschneiden gefertigt.

Kalandrieren

Beim Kalandrieren handelt es sich auch um ein kontinuierliches Verfahren, bei dem das PVC-Granulat in einem Spalt zweier gegenläufig rotierender beheizten Metallwalzen aufgeschmolzen (ca. 160-220°C) und gepresst wird⁸¹. Weitere nachgeschaltete Walzen, teils beheizt, teils gekühlt, sorgen für eine zusätzliche Homogenisierung und



Dickeneinstellung des Materials. Die Walzen besitzen unterschiedliche Größen (Durchmesser⁸²) und liegen in verschiedenen Abständen zueinander, je nachdem, welche Eigenschaften gewünscht sind (z.B. Dicke, Festigkeit). Man erhält schließlich ein flächiges Endprodukt. Mit dieser Technologie werden z.B. Böden, Platten oder Folien hergestellt.

⁸⁰ Dominghaus, Hans: „Kunststoffe II, Kunststoffverarbeitung“, S.53

⁸¹ Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie: „Technologiestudie zur Verarbeitung von PVC“, S.17

⁸² Der Durchmesser variiert zwischen einigen Dezimetern und 800mm

Spritzgießen

Der erste Schritt dieses Verfahrens entspricht weitgehend der Extrusion⁸³:

Auch hier wird das Granulat über ein beheiztes Schneckensystem befördert und dort plastifiziert. Jedoch wird das Spritzgießen diskontinuierlich durchgeführt: Die Kunststoff-Schmelze wird über eine Öffnung am Ende der Schnecke in eine bestimmte Form gespritzt. Dort kühlt der Kunststoff ab. Auf diese Weise können z.B. Rohr-Formstücke, Gehäuse, Sitzschalen und auch Möbel hergestellt werden.

Blasformen

Beim sogenannten Blasformen wird das Material ebenfalls in einem Extruder aufgeschmolzen. Am Ende der Schnecke wird es jedoch durch eine sehr feine Ringdüse gepresst, sodass ein dünnwandiger Schlauch entsteht. Dieser Schlauch wird mit Druckluft in eine bestimmte Form geblasen und dort schließlich abgekühlt. Man kann auf diese Weise dünnwandige Hohlkörper, wie z.B. Flaschen produzieren⁸⁴. Außerdem kann man sehr dünne Folien herstellen, indem man den Schlauch um ein Vielfaches seines Ausgangsdurchmessers aufbläst und schließlich flach auslegt.

Pastenverarbeitung

Beim Verrühren von Emulsions-PVC mit Weichmachern erhält man ein homogenes zähflüssiges Produkt, eine sogenannte Paste. Diese Paste kann man auf unterschiedliche Arten zu einem Endprodukt verarbeiten: Durch Besprühen oder Anstreichen einer Passform, durch Eintauchen in die Paste oder durch Rotationsgießen. Anschließend erwärmt man die Masse auf 180-230°C mittels Heißluft oder Infrarot-Strahlung. Dabei setzt das thermoplastische Gelieren ein⁸⁵. Beim Abkühlen wird die endgültige Form fixiert und die Passform kann entfernt werden.

3. Der PVC-Boom der Nachkriegszeit – Die 50er bis 70er

Während des zweiten Weltkriegs war es in Deutschland weitgehend zum Stillstand der PVC-Produktion gekommen. Erst das Ende des Krieges sollte einen Neuanfang für die deutsche Industrie bedeuten. Jedoch waren die Voraussetzungen zunächst ausgesprochen schlecht. Viele Industrieanlagen und Städte lagen in Trümmern. An eine direkte Aufnahme der Produktion war überhaupt nicht zu denken. Grundlegende

⁸³ Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie: „Technologiestudie zur Verarbeitung von PVC“, S.14

⁸⁴ Felger, Hans: „Kunststoff Handbuch 2/2 Polyvinylchlorid“, S.1059ff

⁸⁵ Vgl.: AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.21f

Bedürfnisse waren bei einem Großteil der Bevölkerung nicht gedeckt. So stand der tägliche Kampf um Nahrung und die Suche nach einer Unterkunft an der Tagesordnung. Zudem fehlte es an allen wichtigen Produktionsfaktoren: Es gab kaum Produktionsstätten und es herrschte Mangel an Arbeitskräften und Kapital.

Kriegsschutt beseitigen und Wohnraum schaffen, waren die vorrangigen Ziele der Zeit. Und diese mussten teilweise mit bloßen Händen erreicht werden. Dieses Bild prägte die ersten Nachkriegsjahre in Deutschland. Erst langsam konnte wieder an einen Einstieg in die industrielle Produktion gedacht werden. Jedoch sollte PVC, wie auch die gesamte Industrie in Deutschland, sehr bald einen nie da gewesenen Aufschwung erhalten, der als das Wirtschaftswunder in die Geschichte eingehen sollte.

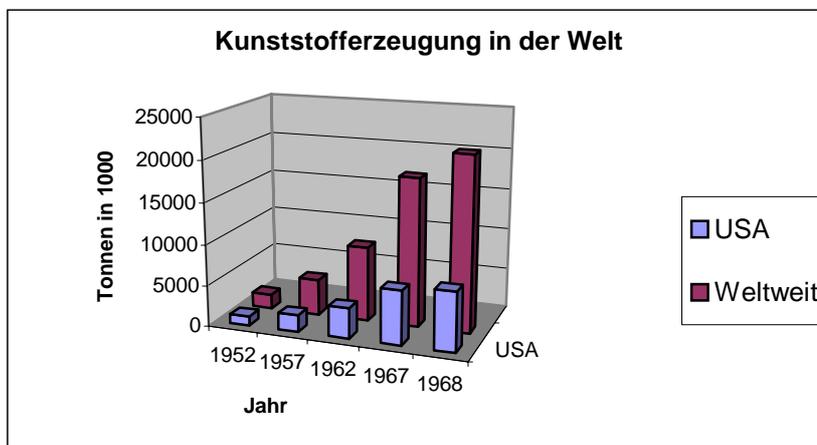


Tabelle 3.1

aus: Dominghaus, Hans: „Werkstoffe aus der Retorte“

Zudem brachten die neuen Produktionsverfahren, die mit Ethylen statt Acetylen als Ausgangsstoff arbeiteten, Vorteile, die eine bessere und einfachere Herstellung ermöglichten. Die enorme Zunahme der Kunststoffe in der Alltagswelt prägte das Bild der Zeit und wurde unter dem Begriff „Plastik-Kultur“ bekannt.

3.1. Die wirtschaftliche Entwicklung

Kunststoffe, so auch PVC, begegnen uns heute selbstverständlich im Alltag. Die Kunststoff-Industrie ist mit knapp 70 Jahren ein etablierter Industriezweig. Erste „großindustrielle“ Ansätze waren bereits in den 30er Jahren vorhanden:

1930 belief sich die weltweite Produktion von Kunststoffen auf 100.000 t. 1935 erreichte man bereits 330.000 t. Es war also zu einer Verdreifachung innerhalb von 5 Jahren gekommen. Bereits vor dem zweiten Weltkrieg wurde das technische und wirtschaftliche Potential von PVC erkannt. Das Wachstum der Branche war für damalige Verhältnisse enorm. Auch im weiteren Verlauf setzte sich dieser Trend fort:

1955 belief sich die weltweite Produktion von PVC bereits auf 3,05Mio t und weitere 5 Jahre später auf 6,9Mio t⁸⁶. Auch die deutsche Industrie wurde in den 50er Jahren von diesem weltweiten Kunststoff-Boom ergriffen und lag mit der Produktion europaweit am Ende der 60er Jahre sogar an der Spitze.

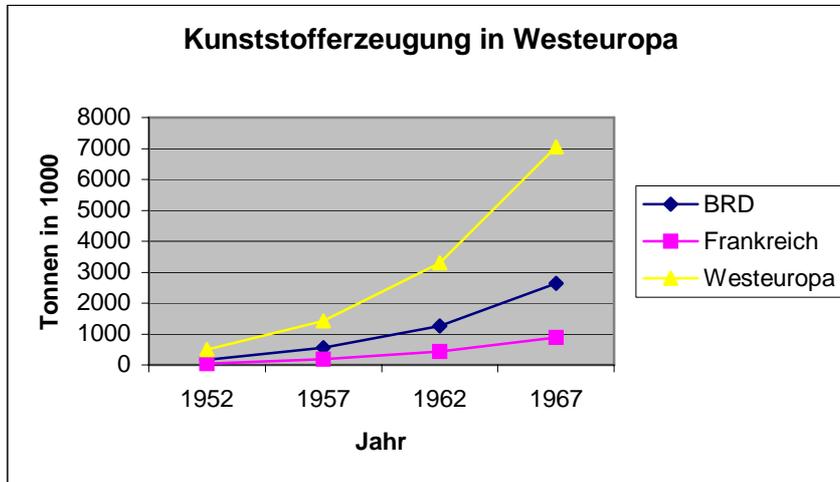


Tabelle 3.2

aus: Dominghaus, Hans: „Werkstoffe aus der Retorte“

Bis zum Ende der 60er Jahre stand die PVC-Produktion auch noch an erster Stelle der Kunststoff-Industrie. Jedoch setzten sich die Polyolefine, insbesondere das Polyethylen (PE), in den kommenden Jahrzehnten immer stärker durch.

Kunststoff	Weltverbrauch in 1000t						
	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980
PVC	220	520	1450	3300	6100	7700	11000
Polystyrol	140	300	640	1200	2400	2900	3800
Polyolefine	30	225	990	3300	8900	12500	20000

Tabelle 3.3; Aus: Felger, Hans: „Kunststoffhandbuch 2/1 Polyvinylchlorid“

Bis zur heutigen Zeit hat dieser Trend Bestand und PE-Produkte beherrschen den Markt.

Produzierte Kunststoffe Weltweit, 1998		
Kunststoff	Produktion in Mio t	
PE	55,3	= 35 %
PVC	30,0	= 19%
PP	28,3	= 18%
Polystyrol	14,1	= 9%
Techn. Kunststoffe	12,5	= 8%
PUR	9,5	= 6%
Sonstige	7,9	= 5%

Tabelle 3.4; Aus: PVC Plus: „Produktinformation Nr.1 PVC“

⁸⁶ Dominghaus, Hans: „Werkstoffe aus der Retorte“, S.14

Jedoch soll diese Feststellung nicht den Erfolg des Produktes PVC schmälern: Von 1950-1980 betrug der durchschnittliche Anstieg der Produktion 14%⁸⁷. Die Marktanteile des PVC wuchsen kontinuierlich bis auf die Jahre 1974/75 aufgrund der Ölkrise.

Für bestimmte Anwendungen besitzt PVC aufgrund seiner vielfältig möglichen Eigenschaften durch Zusatz von Additiven Vorteile gegenüber PE. Außerdem beansprucht PVC, das nur zu 43% aus Ethylen besteht, weniger Ressourcen. Im Zuge zunehmender Rohstoffknappheit wirkt sich auch dieser Punkt positiv für PVC aus. Zudem ist noch immer ein Wachstum der PVC-Branche zu verzeichnen. Im Jahr 2004 legte die PVC-Verarbeitung um 4,5% zu und die Produktion um 1,8%. Damit wächst die Branche stärker als die gesamte Wirtschaft. Das reale Wirtschaftswachstum lag 2004 bei 1,6%.

Die PVC-Branche spielt gerade in Westeuropa eine große Rolle. Im Vergleich zu Japan und USA nimmt die PVC-Produktion einen Großteil des Kunststoff-Marktes ein.

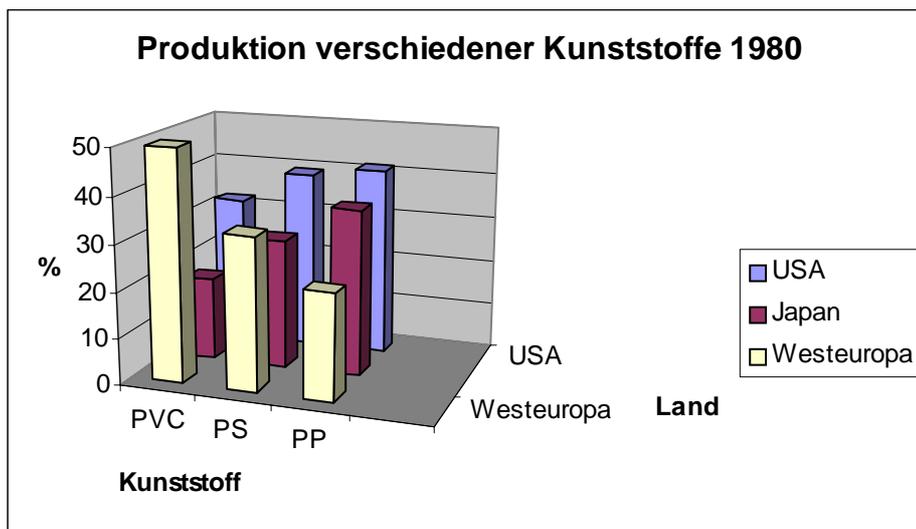


Tabelle 3.5

aus: Felger, Hans: „Kunststoffhandbuch 2/1 Polyvinylchlorid“

Die PVC-Industrie ist somit nicht nur Produzent, sondern auch Arbeitgeber. Europaweit sind bei ca. 6.500 Firmen über 150.000 Beschäftigte⁸⁸ in der PVC-Branche angestellt. Diese Betriebe erwirtschaften ca. 19,1 Mrd. Euro⁸⁹. Darin enthalten sind die Erdöl-Raffinerien, Elektrolyse-Anlagen, Weichmacher-Betriebe und natürlich die Hersteller der PVC-Endprodukte.

⁸⁷ Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.7

⁸⁸ AgPU (Hrsg.): „Volkswirtschaftliche Daten und Fakten zu PVC“, S.11

⁸⁹ Bezogen auf das Jahr 2000.

Deutschland produziert nicht nur für den Eigenbedarf, sondern findet in PVC auch enormes Handelspotential. Deutschland ist mit PVC sogar „Exportweltmeister“ in Europa. 1998 wurden 716 Tausend Tonnen ins Ausland verkauft. Betrachtet man die gesamte Handelsbilanz wird dessen Bedeutung für die Wirtschaft besonders deutlich:

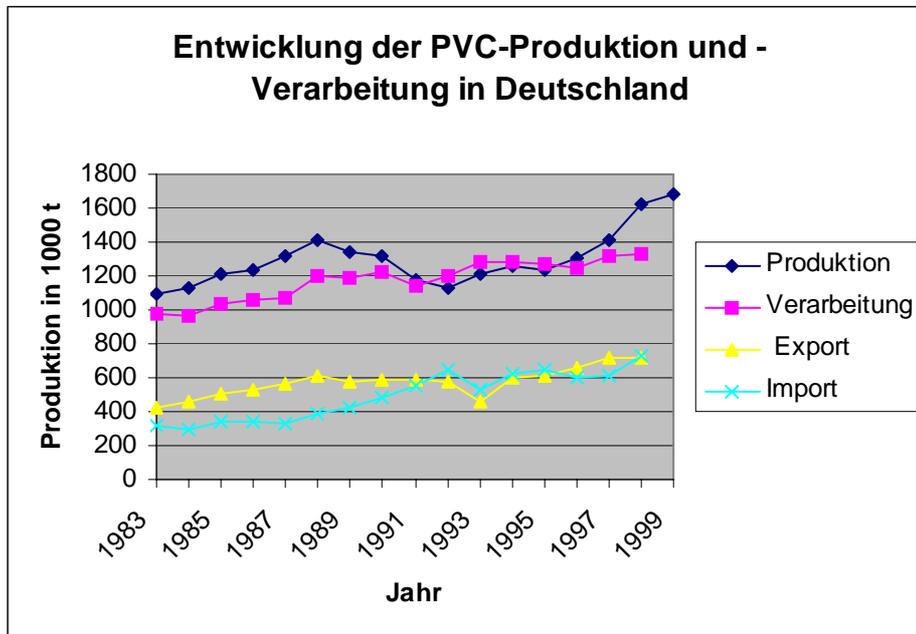


Tabelle 3.6; aus: AgPU (Hrsg.): „Volkswirtschaftliche Daten und Fakten zu PVC“

Der Trend zu PVC-Produkten ist weiterhin, vor allem aufgrund der hervorragenden Eigenschaften und der vielfältigen Verarbeitungsmöglichkeiten, ungebrochen. Neue effizientere, umweltfreundlichere Anlagen, z.B. im Bereich Recycling sind in Planung. Außerdem zählen zur PVC-Branche auch weitere wirtschaftliche Felder, wie die Recycling-Betriebe, sodass die wirtschaftliche Bedeutung zusätzlich steigt.

3.1.1. Beispiel: Die wirtschaftliche Entwicklung der PVC-Rohre

Eine ganze Reihe von Einsatzgebieten erlebte in den 60er und 70er Jahren einen rasanten Anstieg von PVC-Produkten. Am Beispiel der Rohre soll dies exemplarisch verdeutlicht werden.

Schon Ende der 30er Jahre wurden, jedoch nur in geringem Maßstab, PVC-Rohre produziert. Anfang der 50er Jahre wurde die Produktion nach dem kriegsbedingten Stillstand wieder aufgenommen. In den folgenden Jahren kam es in Deutschland zu einem enormen Bau-Boom. Die zerstörten Städte wurden wieder aufgebaut und der neu entstandene Wohlstand sorgte für einen Trend zum Eigenheim. Da die bestehenden Abwasserleitungen nicht mehr ausreichend Versorgung boten, mussten viele neue Leitungen verlegt werden. Dabei zeichneten sich die PVC-Produkte durch

enorme Vorteile gegenüber den Konkurrenzprodukten wie Gusseisen, Steinzeug oder Beton aus: Sie waren billiger, korrosionsbeständig und aufgrund der glatten Oberfläche weniger anfällig für Verstopfungen aufgrund von Ablagerungen⁹⁰. Zudem waren sie um ein Vielfaches leichter als die anderen Materialien und konnten daher einfacher verlegt werden. Dank dieser Vorteile setzte PVC sich gegen seine Konkurrenten durch und wurde so zum Spitzenprodukt bei den Abwasserleitungen.

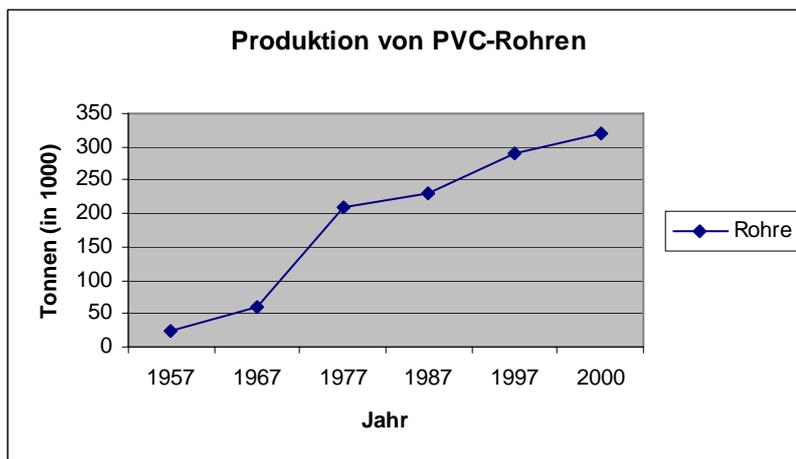


Tabelle 3.7

aus: KRV(Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“

3.2. Produktpalette

Die Produktpalette von PVC ist durch eine enorme Vielfalt von Anwendungen gekennzeichnet. Die Produkte begegnen uns überall im alltäglichen Leben, von A wie Abwasserrohr über B wie Bodenbeläge bis hin zu Z wie Zeltbeschichtungen. Eine ausführliche Behandlung aller Produkte wäre in diesem Rahmen nicht möglich. Jedoch soll eine kurze Auflistung die allgegenwärtige Position von PVC verdeutlichen:

- **Baubereich:** Fenster, Rollläden, Bodenbeläge, Beschichtungen, Möbelfolien, Wellplatten, Traglufthallen, Regenrinnen, Duschvorhänge, Kantenschutz, Dachbahnen, Kabelisolierung, Tapeten, WC-Brillen, Spülkästen
- **Freizeitartikel:** Schlauchboote, Modelliermassen, Planschbecken, Wasserbälle, Zeltbeschichtungen, Zeltdächer, Puppen, Ski- und Taucherbrillen, Planen, Strandkörbe, Tischtücher, Lampenschirme, Regenkleidung, Taschen, Schuhsohlen, Gartenschläuche, Pinsel, Bürsten, Schallplatten, Gartenmöbel
- **Umwelt:** Deponiefolien, Wasserleitungen, Abwasserrohre

⁹⁰ KRV (Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“, S.3

- **Büroartikel:** Klarsichthüllen, Computergehäuse, Kugelschreiber, Klebebänder, Disketten, Radiergummi, Aktenordner
- **Medizin:** Infusionsbeutel, Behälter für Blutkonserven, Tablettenverpackungen, Röntgenschürzen, Sauerstoffzelte, Hörgeräte
- **KfZ-Bereich:** Autoabdeckplanen, Benzinschläuche, LKW-Planen, Unterbodenschutz, Sitzbezüge, Konsolen, Armaturenbretter
- **Verpackungen:** Becher, Flaschen, Deckel, Lebensmittelschutz, Luftpolsterverpackungen, Schrumpfetiketten
- **Sonstiges:** Antirutschbeläge, Scheckkarten, Telefonkarten⁹¹

Außerdem sollen die Verwendungsbereiche der PVC-Produkte in Deutschland von 1995 gegenübergestellt werden, damit die Schwerpunkte der Produktion deutlich werden.

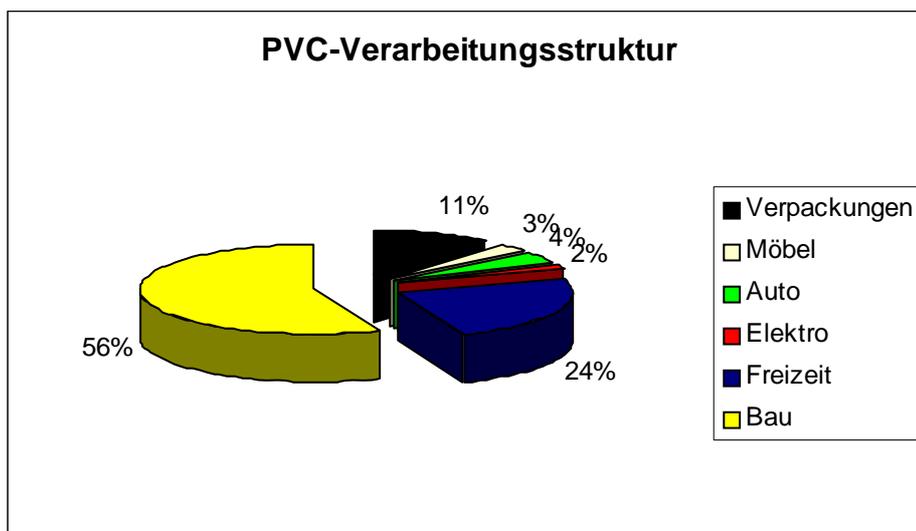


Tabelle 3.8

aus: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“

Der Bausektor kristallisiert sich als größter Abnehmer für PVC-Produkte als Werkstoff heraus. Er ist auch in diesem Bereich vielfältig einsetzbar und erleichtert dank seiner guten Verarbeitungseigenschaften die Arbeit.

Eine andere mögliche Einteilung der PVC-Produktpalette bezieht sich auf die vorhandenen Eigenschaften des Produktes. Die grobe Gliederung erfolgt dementsprechend nach Hart- und Weich-PVC. Eine Einteilung nach diesem Schema wird in der folgenden Tabelle gezeigt:

⁹¹ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S. 24

Verarbeitung nach Produkteinteilung (in 1000t) nach ENGELMANN 1993		
Bereich	BRD 1992 In Klammern %	Westeuropa 1992 In Klammern %
Hart-PVC	996 (70)	3323 (65)
Fenster, Profile	393 (27)	824 (16)
Rohre, Fittings	326 (26)	1359 (27)
Hartfolien	249 (17)	542 (11)
Hohlkörper	8 (1)	420 (8)
Andere	20 (2)	178 (3)
Weich-PVC	429 (30)	1782 (35)
Kabelmassen	107 (7)	434 (9)
Folien	100 (7)	380 (7)
Beschichtungen	93 (7)	223 (4)
Bodenbeläge	61 (4)	241 (5)
Schläuche, Profile	50 (4)	208 (4)
Andere	18 (1)	296 (6)
Gesamt-PVC	1425 (100)	5105 (100)

Tabelle 3.9; Aus: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“

Im Folgenden sollen die wichtigsten Produkte genauer betrachtet und deren Eigenschaften und Entwicklung beschrieben werden.

3.2.1. Rohre (Hart-PVC)

23% der gesamten PVC-Produktion geht in die Herstellung von Rohren. Dabei kommen ihnen unterschiedliche Funktionen zu:

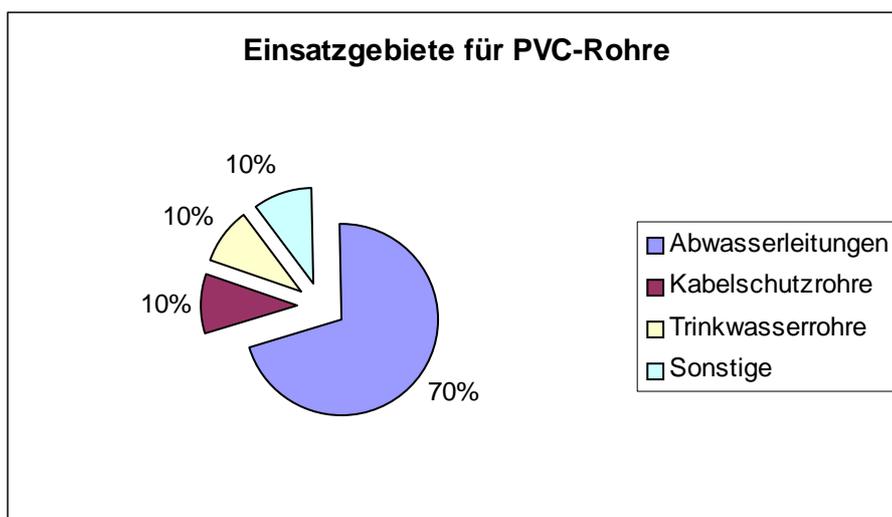


Tabelle 3.10

aus: KRV (Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“

Abwasserleitungen sind der wichtigste Verwendungszweck der PVC-Rohre.

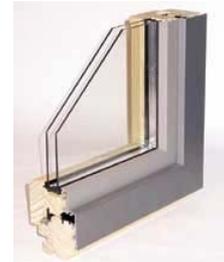
75% aller Kunststoffrohre sind aus PVC. Damit nimmt dieser Kunststoff die Spitzenposition im Rohrbereich ein.



Aufgrund der guten Oberflächenbeschaffenheit lassen sie sich gut verbinden bzw. verlegen und sind weniger anfällig für Verstopfungen. Sie sind stoßfest, leicht und nicht korrosionsanfällig, was ihnen gegenüber ihren Konkurrenten klare Vorteile bringt. Zudem ist der Preis relativ niedrig. Die Lebensdauer war zunächst mit 30 Jahren eingeplant, aufgrund neuerer Untersuchungen kann man jedoch von einer realistischen Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgehen. Die Nachfrage nach PVC-Rohren ist auch in den letzten Jahren weiter gestiegen⁹². Zudem hatte der Bausektor in Deutschland aufgrund der Wiedervereinigung einen Schub erhalten. Sehr viele alte Wohnhäuser mussten renoviert werden und viele neue Einfamilienhäuser wurden gebaut. Die PVC-Produkte wurden dabei vermehrt eingesetzt.

3.2.2. Fenster / Profile (Hart-PVC)

Dieser Produktbereich stellt zur Zeit den größten Anwendungsbereich von PVC in Deutschland mit 27% dar. Die Gesamtzahl der produzierten Fenster-Einheiten lag 1993 bei ca. 23 Millionen. Davon entfielen 43% auf PVC-Produkte und damit ist der Kunststoff auch Marktführer. Deutschland ist der wichtigste Markt für PVC-Fenster. Im Vergleich zu den Konkurrenzprodukten (Aluminium / Holz) fällt die Gesamtbilanz für PVC durchaus positiv aus, vor allem im Bezug auf den Preis.



3.2.3. Böden (Weich-PVC)



Bei dem Marktanteil von Fußbodenbelägen nimmt PVC 1998 Platz 2 mit 22% ein, nach den Textil-Waren. Auch hier besitzt PVC also eine starke Marktposition.

Von 1992-1997 erhielten die PVC-Böden einen Zuwachs von 19,5 auf 22%. Der Ausgangspunkt der Produktion von PVC-Böden war der Anspruch in den 40er Jahren der damaligen

⁹² Vgl.: KRV(Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“, S.3

Reichsregierung bei der Herstellung von Fußböden unabhängig von ausländischen Produkten, wie Leinöl, Kork oder Jute, zu sein⁹³. Daher suchte man Stoffe, um eigene Beläge günstig produzieren zu können. PVC konnte diesen Ansprüchen gerecht werden. Die Einsatzgebiete von PVC-Böden sind sehr vielfältig: In Küchen, Sanitäranlagen, Fluren, Krankenhäusern oder Einkaufshäusern⁹⁴ kann man sie vermehrt vorfinden. Dabei kommen PVC-Böden seine positiven Eigenschaften zu Gute: Sie sind gut zu reinigen, strapazierfähig, trittschallschluckend und schwer entflammbar⁹⁵. Für die genannten Einsatzgebiete sind das unverzichtbare Eigenschaften.

3.2.4. Kabelummantlung (Weich-PVC)



Diese Anwendung ist sehr bedeutend, da sich in diesem Sektor nur wenige Ersatzstoffe bisher gefunden haben und PE sich aufgrund des Preises nur langsam durchsetzt. Zudem ist diese Anwendung enorm wichtig, da die Kabel ohne eine gute Isolierung im heutigen Maße nicht einsetzbar wären. PVC nimmt zur Zeit die Marktführerrolle mit knapp 50% ein, dicht gefolgt vom PE mit 43%. Die Einsatzbereiche lassen sich wie folgt gliedern: 23% im Installationsbereich, 19% in der Nachrichtentechnik, 18% bei Geräten und Maschinen und weitere Verwendung im KfZ-Bereich⁹⁶. Dabei sprechen folgende Eigenschaften für PVC als Ummantlung: sehr gute Isolierfähigkeit, Temperaturbeständigkeit, günstiger Preis, Schwerentflammbarkeit und sehr gute Flexibilität.

3.2.5. Weitere Produkte

In den Boom-Jahren der Kunststoffe hielt PVC auch Einzug in den Möbelsektor und bei Hausfassaden. Sogar im Bekleidungssektor hatte sich PVC in bestimmten Bereichen durchgesetzt z.B. bei Jacken, die z.T. bis heute noch Verwendung als Regenbekleidung bzw. Arbeitsschutzbekleidung finden. Aber auch der Freizeitsektor wurde um PVC-Produkte erweitert⁹⁷: Puppen, aufblasbares Wasserspielzeug, Zelte und Schallplatten sollen die Allgegenwart von PVC verdeutlichen. Zudem wurde

⁹³ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.26

⁹⁴ PVC Plus: „Produktinformation Nr.3“

⁹⁵ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.27

⁹⁶ PVC Plus: „Produktinformation Nr.9“, S.2

⁹⁷ Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/2 Polyvinylchlorid“, S.1187ff

Hart-PVC als Lebensmittelverpackung z.B. bei Keksschachteln eingesetzt. Aufgrund seiner Steifheit und Stossfestigkeit verwendete man es sehr gerne. Mit der Zeit wurde es allerdings im Lebensmittelbereich mehr und mehr von PE



verdrängt und spielt dort heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Im Büroartikel-Sektor besitzt es immer noch Verwendung als Aktenordner, Stiftehalter u.v.m..

PVC findet heute eine wichtige Bedeutung im Bereich des medizinischen und pharmazeutischen Sektors: Dort wird es für Tablettenverpackung (Hart-PVC) und für Blutbeutel oder Kanülen (Weich-PVC) eingesetzt⁹⁸.

3.3. Erste Bedenken

PVC-Produkte waren also allgegenwärtig und schienen ihren Anforderungen in allen Bereichen gerecht zu werden. Aufgrund der beschriebenen Produktvielfalt lässt sich auch von einer PVC-Euphorie sprechen. Jedoch folgte auf diese rundum positive Bilanz aufgrund mehrerer Zwischenfälle die Ernüchterung und die ernsthafte Auseinandersetzung mit dem Massenkunststoff PVC.

Bereits 1973 hatte es erste Berichte über den Zusammenhang von VC und Lebertumoren gegeben. Zunächst blieben diese Hinweise ohne Folgen. Im Jahr 1974 wurde die amerikanische Arbeitsschutzbehörde OSHA darüber unterrichtet, dass der Tod einiger Mitarbeiter in der PVC-Industrie, insbesondere von Kesselarbeitern, mit ihrem Umgang mit VC zusammenhängen könnte⁹⁹. Die erste Annahme, dass es sich um eine schwere Form von Krebs, dem sogenannten Leberangiosarkom, handelte, bestätigte sich später. Noch im gleichen Jahr wurden strikte Vorschriften im Umgang mit VC beschlossen und eingeführt. Arbeiter sollten dem gefährlichen Monomer nicht mehr direkt ausgesetzt werden. So wird beispielsweise seitdem die Reinigung der Kessel nur noch maschinell durchgeführt.

Schon lange vorher, im Jahr 1949, wurden die Symptome der Exposition von VC in Russland beobachtet und wurden als VC-Krankheit bekannt¹⁰⁰. Die potentiellen Gefahren von VC schien man aber verkannt oder bewusst ignoriert zu haben.

Ein weiterer Schlag gegen PVC wurde die sich anbahnende Müllkrise der Kunststoffe Ende der 80er Jahre. Man hatte die Entsorgungsfrage der Kunststoffe eine ganze Zeit

⁹⁸ Vgl.: PVC Plus: „Produktinformation Nr.12“

⁹⁹ Vgl.: Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/2 Polyvinylchlorid“, S.1437

¹⁰⁰ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort „Vinylchlorid“

vor sich her geschoben und stand nun vor einem enormen Müllberg. Jedoch wurden in den Folgejahren Verwertungsmöglichkeiten für die Kunststoffe eingeführt und kontinuierlich ausgebaut.

4. Bedenken gegenüber PVC – Die 80er und 90er

Erste Bedenken in den 70er Jahren führten zur genaueren Untersuchung und strengeren Bewertung von PVC und seinen Additiven auf ökologischer und toxikologischer Ebene. Zum einen stand die Auswirkung auf den Menschen, zum anderen die Belastung der Umwelt im Zentrum der Betrachtung. Die einzelnen Chemikalien und Stoffströme wurden bei Produktion, Anwendung und Entsorgung überprüft und bewertet. Dabei wiesen einige davon ökologische bzw. toxikologische Gefahren auf. In den Folgejahren versuchte man diese Problemfälle zu beheben bzw. das Gefahrenpotential auf ein Minimum zu reduzieren.

Im Folgenden sollen die wichtigsten ökologischen und toxikologischen Bedenken, die gegenüber PVC und seinen Stoffströmen geäußert wurden, betrachtet werden.

4.1. Toxikologische Bedenken

Der Begriff Toxikologie stammt aus dem Lateinischen und kommt von *toxikum* = Pfeilgift. Bei der Toxikologie handelt es sich um das Teilgebiet der Pharmakologie, das sich mit den Giften und deren Wirkungsweisen, ihrem Stoffwechsel (Metabolismus), der Ermittlung von toxischen Werten, Vergiftungserscheinungen und deren Behandlungsmöglichkeiten beschäftigt. Im Zentrum stehen die Beobachtung und Beurteilung von Giften.¹⁰¹ Eine Schädigung des Körpers durch Gifte kann in vielfältiger Form in Erscheinung treten. Zum einen können kurzfristige Erkrankungen, wie z.B. Hautreizungen, den Körper befallen. Zum anderen können gefährliche Langzeitwirkungen wie Krebs auftreten, die schließlich bis zum Tod führen können. Aber auch hormonelle Wirkungen werden mit untersucht. Hormone steuern die Entwicklung und Funktion von Fortpflanzungsorganen, Gehirn und Immunsystem. Bei schädlicher Einwirkung von Giften auf den Körper können diese hormonelle Wirkungen verstärkt, vermindert oder sogar ganz verhindert werden¹⁰². Zur Zeit stehen insbesondere die Weichmacher im Verdacht solche Schäden am Körper zu verursachen.

¹⁰¹ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Toxikologie

¹⁰² Vgl.: WWF (Hrsg.): „Gefahren für die menschliche Gesundheit durch hormonell wirksame Zusätze in Kunststoffprodukten“, S.5

Die Auswirkungen der Gifte werden aufgrund von Tierversuchen ermittelt. Neuere Forschungsansätze versuchen z.B. genotoxische Wirkungen auch anhand von Bakterien zu prüfen. Zudem werden Erfahrungen von Großunfällen, bei denen Menschen betroffen waren, intensiv ausgewertet.

Das toxikologische Wissen wächst aufgrund dieser Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen rasant, aber auch angetrieben vom Inkrafttreten zahlreicher Gesetze zum Schutz des Menschen werden weitere Untersuchungen angestrebt¹⁰³.

Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse, inwieweit bestimmte Konzentrationen von Substanzen für den Menschen, aber auch für Tiere, schädlich sind, werden Grenzwerte festgelegt, die bei der Herstellung und Verwendung von Produkten eingehalten werden müssen. Es gibt mehrere wichtige Definitionen von Grenzwerten: zum einen den MAK = maximale Arbeitsplatz Konzentration. Dieser ist wichtig für Personen, die mit einer bestimmten chemischen Substanz regelmäßig am Arbeitsplatz zu tun haben. Der andere wichtige Grenzwert ist der ADI = Acceptabel daily intake. Dabei handelt es sich um die „duldbare tägliche Aufnahmemenge“, die für den Mensch ermittelt wurde, ausgehend von der höchsten Dosis eines Stoffes beim Tierversuch, bei der noch kein (schädlicher) Effekt nachgewiesen werden kann. Dies entspricht dem NOEL = No observed effect level¹⁰⁴. Die Angaben erfolgen in g/Tag bzw. in TE = Toxikologisches Äquivalent. Besondere Aufmerksamkeit bei den toxikologischen Untersuchungen wird denjenigen Stoffen gewidmet, denen der Mensch regelmäßig ausgesetzt ist, da sie bereits ubiquitär vorliegen. Dies trifft auch auf Teile der PVC-Produktion zu. Daher ist die toxikologische Betrachtung dieser Stoffströme von großer Bedeutung.

4.1.1. Gefahren der Ausgangsprodukte

Reines PVC ohne Additive ist ein toxikologisch unbedenklicher Stoff. Für PVC-Staub, der bei der Produktion und Weiterverarbeitung auftreten kann, gilt der MAK-Wert von 5 ng/m³. Dies entspricht den Dosen von Holzstäuben oder Mehl¹⁰⁵. Die toxikologischen Gefahren gehen bei PVC von den Ausgangsprodukten aus. Trotz dieser wichtigen Unterscheidung ist PVC zu Beginn der Kritik immer als Endprodukt in Verruf geraten.

¹⁰³ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Toxikologie

¹⁰⁴ Vgl.: Reichel, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.6

¹⁰⁵ Reichel, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.178

4.1.1.1. Chlor

Bereits bei einem der ersten Schritte der Produktion tritt ein Stoff auf, der bei den Umweltverbänden einen schlechten Ruf besitzt: Chlor. Das Element Chlor wird durch die Chloralkalielektrolyse in großen Mengen gewonnen (siehe Punkt 2.4.1.3.). Bei der Produktion, aber auch bei der weiteren Verarbeitung, kann es zum Austritt kommen und damit auch zum Kontakt mit Mensch und Umwelt.

Chlor (Cl_2) ist unter Normalbedingungen ein grüngelbes, stechend riechendes Gas mit einem Siedepunkt von -34°C , das sich jedoch durch Druck leicht verflüssigen lässt. Es ist sehr reaktionsfähig und wird aufgrund seines Oxidationsvermögens oft als Bleichmittel oder Anti-Algen-Mittel eingesetzt. Chlor-Gas zerstört tierisches und pflanzliches Gewebe teils durch Oxidation, teils durch Chlorierung von organischen Verbindungen. Auf diese Weise vernichtet Chlor auch Bakterien und Algen. Luft, die 0,5-1% Chlor-Gas enthält wirkt auf Säugetiere und Menschen rasch tödlich. Luftwege und Lungenbläschen werden aufgrund von Salzsäure-Bildung verätzt. Nach stundenlangem Einatmen von chlorhaltiger Luft können tödliche Vergiftungen eintreten. Der MAK-Wert von Chlor liegt bei $1,5 \text{ mg/m}^3$.¹⁰⁶ Selbst bei Gehalten von 0,001% greift es die Lungen schwer an. Jedoch kann Chlor-Gas bereits ab Konzentrationen von 0,0001% am charakteristischen Geruch erkannt werden¹⁰⁷. Ein rechtzeitiges Erkennen von ausströmendem Gas ist also möglich. Aufgrund seiner aggressiven toxischen Eigenschaften wurde Chlor-Gas im ersten Weltkrieg als erstes Massenvernichtungsmittel eingesetzt (chemischer Kampfstoff)¹⁰⁸.

Bestimmte organische Chlorderivate (Chlorbiphenyle / Chlorkohlenwasserstoffe), die auch bei der Verarbeitung oder Verbrennung von PVC-Produkten auftreten können, rufen Hauterkrankungen hervor¹⁰⁹. Außerdem wirken einige auch stark toxisch und können den Körper dauerhaft schädigen¹¹⁰. Daher bestehen eine ganze Reihe von Vorsichtsmaßnahmen beim Arbeiten mit bzw. bei der Herstellung von Chlor.

4.1.1.2. Vinylchlorid (VC)

Auch bei der Weiterverarbeitung von Chlor entsteht im nächsten Schritt wieder ein gefährliches Produkt: Das VC-Monomer. Insbesondere dieses Zwischenprodukt sorgte bei der Diskussion um PVC seit der Bestätigung seiner kanzerogenen Wirkung

¹⁰⁶ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Chlor

¹⁰⁷ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Chlor

¹⁰⁸ Greim, H. (Hrsg.): „Toxikologie, Eine Einführung für Naturwissenschaftler“, S.488

¹⁰⁹ Reichel, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.110; sogenannte „Chlorakne“

¹¹⁰ Reichel, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.110

für erhebliche Kritik. Jedoch wurden sofort nach Bekanntwerden der Ergebnisse strenge Vorkehrungen zur Verhinderung der VC-Exposition von Arbeitern und Verbrauchern getroffen. Grundsätzlich kann man ein Austreten der Substanz bei Produktion und Verarbeitung nicht vollständig ausschließen.

VC ist ein farb- und geruchloses, bei höheren Konzentrationen süßlich riechendes Gas. Es ist leicht entflammbar; Explosionsgrenzen in der Luft liegen bei 3,8-31%¹¹¹. Lange Zeit galt VC als unschädlich mit lediglich leicht anästhetischer Wirkung und Reizung der Augen. Es wurde daher auch versuchsweise als Narkosemittel eingesetzt, aufgrund negativer Nebenwirkungen (Erbrechen) jedoch bald darauf wieder abgeschafft. Über chronisch-toxische Wirkungen wurde erstmals Mitte der 60er Jahre berichtet, jedoch erst 1974 wurde das klinische Bild der sogenannten VC-Krankheit als systematisch erkannt. Der Systemkomplex der VC-Krankheit umfasst eine charakteristische Schädigung der Leber in Form des Angiosarkoms, eine Veränderung der Speiseröhre und des Magens (Magenfundusvarianzen), Milzvergrößerung, Verringerung der roten Blutkörperchen (Thrombozytopenie), sowie Schädigung der arteriellen Handdurchblutung. Nach chronischer Exposition mit hohen Konzentrationen ist ein verstärktes Auftreten von Lebertumoren festzustellen¹¹². Das Krankheitsbild ist also sehr vielschichtig. Besonders schwerwiegend für die Beurteilung des Stoffes ist jedoch die Kanzerogenität des VC. Der Stoffwechsel für Mensch und Tier ist weitgehend aufgeklärt: Nach Aufnahme wird die Substanz durch einen Abbaumechanismus der Leber (mikrosomale Monooxygenasen) zunächst in Chlorethylenoxid geführt, das sich zum Chloracetaldehyd umwandelt. Die kanzerogene Wirkung wird dabei auf das Chlorethylenoxid zurückgeführt. Für die organschädigende Wirkung können beide entstehenden Substanzen verantwortlich gemacht werden.

Wegen dieser nachgewiesenen Wirkung für den Menschen wurde VC in die Kategorie 1 der krebserzeugenden Stoffe der MAK-Liste¹¹³ aufgenommen. Für bestehende Produktions-Anlagen der PVC-Industrie gilt eine technische Richtkonzentration (TRK) von 8 mg/m³, im übrigen gilt 5 mg/m³.¹¹⁴ Bei eingehaltenen Grenzwerten bestehen keine Bedenken für die betroffenen Arbeiter

¹¹¹ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Vinylchlorid

¹¹² Reichelt, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.102

¹¹³ Kategorie 1: „positive Befunde aus epidemiologischen Untersuchungen“

¹¹⁴ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Vinylchlorid

bzw. für die Bevölkerung. Die Betriebe werden aufgrund der Gefährdung regelmäßig auf die einzuhaltenden Grenzwerte überprüft.

Der Rest-Monomer-Gehalt im PVC beträgt bei der Suspensions-Polymerisation nach der Entgasung 100-1000 µg/kg¹¹⁵. Jedoch sinkt er bei der weiteren Verarbeitung des Produkts stark ab, sodass keine Bedenken für den Endverbraucher bestehen.

Die Umweltverbände beanstanden im Wesentlichen nicht den „Normalzustand“, sondern die Auswirkungen eines möglichen Unfalls mit VC. Die Folgen sind tatsächlich sehr kritisch zu bewerten. Daher ist auf eine strenge Arbeitssicherheit in den betroffenen Betrieben zu achten.

4.1.2. Gefahren der Additive

Ein weiteres Gefahrenpotential besteht bei den Additiven. Bereits bei der Produktion der einzelnen Stoffströme treten Gefahren auf, aber auch bei der späteren Verwendung und vor allem der Entsorgung treten unerwünschte Nebeneffekte auf, die als Anlass zur Kritik genommen wurden. Dabei spielen insbesondere zwei Additive eine zentrale Rolle: Stabilisatoren, darunter insbesondere die Cd/Zn-Seifen, und die Weichmacher, dabei insbesondere das DEHP.

4.1.2.1. Stabilisatoren

An dieser Stelle sollen nur die Cadmium-Stabilisatoren ausführlich behandelt werden. Sie stehen exemplarisch für andere Stabilisatoren wie die Organozinn- oder Blei-Stabilisatoren¹¹⁶, die ebenfalls aufgrund ihrer toxikologischen Bedenklichkeiten in Verruf gekommen und daher von Markt entfernt worden sind bzw. noch entfernt werden sollen.

Cadmium wurde früher bei der PVC-Produktion in Form von Cd/Zn-Seifen als Stabilisator häufig eingesetzt. Cadmium ist aber giftig und heute als krebserzeugend in der Kategorie II eingestuft, sodass die Produktion dieser Stabilisatoren-Art beendet und auf Ersatzprodukte umgestellt wurde. Lediglich in Fensterprofilen finden sich nach wie vor hauptsächlich Cd-haltige Stabilisatoren¹¹⁷. Diese stammen jedoch noch aus früherer Produktion und sind nur im Falle einer Wiederverwertung zugelassen. Sie bleiben während der Anwendungsphase fest im PVC gebunden¹¹⁸. Daher ist für

¹¹⁵ Vgl.: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.39

¹¹⁶ Eine ausführliche Betrachtung der Blei-Stabilisatoren erfolgt in Kapitel 5.1.2.1.

¹¹⁷ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.43

¹¹⁸ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.10

den Verbraucher keine direkte Gefahr zu erkennen. Die Öko-Verbände weisen aber auch in diesem Fall auf mögliche Brandunfälle sowie die Belastungen bei der Recycling- bzw. Neu-Verarbeitungsphase hin. Bei der Entsorgung werden die Stabilisatoren in jedem Fall früher oder später freigesetzt.

Die orale Aufnahme von Cd-Salzen kann Erbrechen, Störungen im Gastrointestinaltrakt, Leberschädigungen und Krämpfe hervorrufen¹¹⁹. Die Inhalation von Cd-haltigen Dämpfen kann Reizungen der Luftwege und Kopfschmerzen verursachen. Chronische Vergiftungen treten durch Verlust des Geruchssinns (Anosmie), Gelbfärbung der Zähne, Wirbelschmerzen und im fortgeschrittenen Stadium auch durch Osteoporose in Erscheinung¹²⁰. In Verruf gekommen ist Cadmium besonders durch die Itai-Itai-Krankheit in Japan, die zu schweren Skelettveränderungen führte¹²¹. Besonders bedenklich ist die Kumulation von Cadmium in Leber und Nieren. Aufgrund der Verbreitung von Cadmium in der Nahrungskette nimmt der Mensch täglich maximal 0,3 mg auf. Die WHO legt den kritischen Grenzwert bei 0,07 mg pro kg Körpergewicht fest. Aufgrund der mutagenen Wirkung wurde Cd und seine Verbindungen in die MAK-Liste Kategorie 1 der krebserzeugenden Stoffe mit dem Wert 15 µg/l aufgenommen¹²².

4.1.2.2. Weichmacher

Bei den Weichmachern stehen die Phthalate im Zentrum der Kritik. Insbesondere der am weitesten verbreitete Weichmacher **DEHP** wird von den Öko-Verbänden stark kritisiert. DEHP kann in hohen Dosen bei Nagetieren Leberkrebs hervorrufen. Dies beruht auf einem speziellen Mechanismus der Schädigung von Leberzellen bei Nagern (Peroxisomenproliferation¹²³). Für den Menschen spielt dieser Mechanismus jedoch keine Rolle und die beobachteten Effekte sind nicht zu erwarten. Es bleibt also festzuhalten, dass DEHP, sowie die hauptsächlich eingesetzten Weichmacher keine krebserzeugende Wirkung beim Menschen haben. Dies wurde nach allen bisherigen Forschungsuntersuchungen bestätigt. Jedoch führten weitere Untersuchungen zu einem neuen Verdacht. Danach sollen einige Weichmacher hormonell wirksam

¹¹⁹ Reichl, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.160

¹²⁰ Vgl.: Greim, H.: „Toxikologie-Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner“, S.469f

¹²¹ Reichl, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.160

¹²² DFG (Hrsg.): „MAK- und BAT-Werte-Liste 2004“, S.212

¹²³ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.113

sein¹²⁴ und die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen bzw. das Kind im Mutterleib schädigen. Es ist somit als „nichtgenotoxisches Kanzerogen“ einzustufen. D.h. es kann zu Zellentartungen führen, jedoch ohne dabei auf die Erbsubstanz zu wirken. Dabei wird DINP von einigen Instituten auch als leber- und nierenschädigend eingestuft. DEHP soll schädliche Wirkung auf den Hoden¹²⁵ haben. Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die möglichen schädigenden Wirkungen der wichtigsten Weichmacher:

Phthalate	Kanzerogenität	Fortpflanzungs- fähigkeit	Teratogenität	Umwelt
DBP	Keine	R62	R61	R50
DEHP	Keine ¹	R60	R61	Keine
DINP	Keine	Keine	Keine	Keine
DIDP	Keine	Keine	Keine	Keine
BBP²	Keine	R62	R61	R50/53

Tabelle 4.1; aus: AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“

Erklärung:

R60: Kann die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen

R61: Kann das Kind im Mutterleib schädigen

R62: Kann möglicherweise die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen

R63: Kann möglicherweise das Kind im Mutterleib schädigen

R50: Umweltgefährlich

R53: Kann langfristig Schäden im Gewässer bewirken

1: Nach DFG: MAK 2004: krebserzeugend Kategorie 4

2: Noch nicht genau festgelegt

Diese Ergebnisse werden auch von Seiten der PVC-Industrie bestätigt.

Es ist jedoch festzuhalten, dass diese Wirkungen beim erwachsenen Menschen erst ab einer Konzentration auftreten, die üblicherweise beim alltäglichen Umgang mit PVC-Produkten nie erreicht werden. Der NOEL für DEHP liegt bei 40 mg/kg und Tag. Damit wäre beim ausgewachsenen Menschen eine tägliche Aufnahme von 2,8 g tolerierbar. Die tatsächliche Aufnahme liegt jedoch bei 0,003 g¹²⁶. DEHP liegt mittlerweile ubiquitär vor¹²⁷. Es wird zwar innerhalb eines Monats mikrobiell und photochemisch abgebaut, gelangt jedoch durch zunehmenden Weich-PVC-Einsatz weiterhin in die Umwelt.

¹²⁴ WWF (Hrsg.): „Gefahren für die menschliche Gesundheit durch hormonell wirksame Zusätze in Kunststoffprodukten“, S.17

¹²⁵ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Problematik von PVC“, S.15

¹²⁶ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.41

¹²⁷ Klemmer, G./Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“, S.186

Die Einstufungen der Weichmacher sind für die Allgemeinbevölkerung also nicht besorgniserregend, allerdings sind sie von Mitarbeitern der PVC-Branche genau zu beachten. In den letzten Jahren sind Bedenken über zu hohe Konzentrationen für Kinder bzw. Babys laut geworden. Immer wieder argumentieren Verbraucherschützer und Öko-Verbände, dass Babys zu hohen Weichmacher-Konzentrationen ausgesetzt werden, wenn sie Kinderspielzeug aus Weich-PVC in den Mund nehmen. Diese Diskussion ging dabei so weit, dass das europäische Parlament einschritt und den Einsatz von diesen Weichmachern verbot.

4.1.2.3. Exkurs: Weichmacher in Kinderspielzeug

„Großer Erfolg für die Umwelt“ (Spiegel-Artikel 28/2005 S.140). So oder ähnlich titelten alle wichtigen Zeitungen über die Entscheidung der EU zum Verbot bestimmter Weichmacher in Kinderspielzeug. Doch was war der Hintergrund für diese Meldung?

Das europäische Parlament hatte Anfang Juli 2005 beschlossen, dass aus der Gruppe der Phthalate sechs davon einer strengeren Regulierung folgen sollten, um die Verbraucher, in diesem Fall die Kinder, besser vor möglichen schädlichen Nebenwirkungen zu schützen.

Zum einen wurden die drei Phthalate DEHP, DBP und BBP vollständig in allen Kinderspielzeugen und Babyartikeln verboten. Sie wurden bei der Risikobewertung der europäischen Kommission als „krebserregend, erbgutverändernd und fortpflanzungsgefährdend“ eingestuft.



Zum anderen wurden DINP, DIDP und DNOP für Spielzeug und Babyartikel unter 3 Jahren verboten¹²⁸. Bei der Risikobewertung dieser drei Phthalate, war es bei verschiedenen Untersuchungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen „von giftig bis harmlos“ gekommen. Um jedoch jedes Risiko auszuräumen, wurde vorsorglich diese Regelung getroffen.

Da die Entscheidung auf so unterschiedlichen Ergebnissen beruhte, kam es bei den Parteien zu einem geteilten Echo. Während die EU-Abgeordneten von Grünen und SPD die Entscheidung uneingeschränkt begrüßten, betonte z.B. der FDP-Europaabgeordnete Holger Kraemer, dass das Totalverbot für bestimmte Phthalate ein Beispiel für die „vollkommen übertriebene Auslegung des Vorsorgeprinzips“

¹²⁸ Vgl.: http://www.geoscience-online.de/index.php?cmd=wissen_details&id=3115&datum=2005-07-06

darstellte. Der CDU-Mann Horst Schnellhart hielt die Entscheidung ebenfalls für problematisch, da sie von „wenig Realismus“ zeuge¹²⁹. Auch das UBA muss in diesem Zusammenhang eingestehen, dass die Entscheidung „über die wissenschaftliche Beurteilung hinausging“¹³⁰. Es betont aber gleichzeitig, dass damit die besondere Schützenswürdigkeit der Kinder herausgestellt werden soll.

Wie kam es jedoch zu dieser rigiden Entscheidung?

DEHP beispielsweise wurde nach neu ausgewerteten Daten als fruchtschädigend und auch Fruchtbarkeitsbeeinträchtigend eingestuft. Es zeigt somit reproduktionstoxische Eigenschaften. Die WHO legte daraufhin einen TDI-Wert durch orale Aufnahme von 25 µg/kg und Tag fest, wobei der NOEL-Wert bei 3,7 mg/kg und Tag lag (nach CSTEE)¹³¹. Nach diesen Studien wurde DEHP jedoch eindeutig als nicht-krebserregend eingestuft. Daher ist es verwunderlich, dass die EU den Stoff dennoch in diese Kategorie mit einbezieht. Für den erwachsenen Menschen ist unter normalen, alltäglichen Bedingungen keine gesundheitliche Gefährdung zu erwarten. Die besondere Gefährdung der Kinder besteht darin, dass sie Spielzeug in den Mund nehmen, daran lutschen, saugen und beißen (Beißringe). Damit lösen sie eine verstärkte Migration der Weichmacher aus¹³². Der ohnehin schon kleinere menschliche Körper wird somit einer erhöhten oralen Konzentration ausgesetzt, die in den Bereich der toxisch-wirksamen Konzentration reichen kann. Zudem ist der Körper in der Wachstumsphase anfälliger, als der Ausgewachsene. Die von DEHP in Spielzeug ausgehenden Gefahren waren bereits längere Zeit vorher bekannt. Daher gab es in Deutschland bereits seit 1999 ein Verbot für diesen Weichmacher in Spielzeug für Kinder bis zu 3 Jahren¹³³.

Da nun nicht garantiert werden kann, dass jüngere Kinder Spielzeug (z.B. Barbie-Puppen) ihrer älteren Geschwister in den Mund nehmen, reicht eine Altersbegrenzung nicht aus. Daher ist die Erweiterung der Altersbeschränkung positiv zu bewerten.

In Spielzeug und Babyartikeln wurde seit Bekanntwerden dieser Gefahr ohnehin nicht mehr DEHP eingesetzt. Man hatte die Produktion auf DINP und DIDP in Kinderspielzeug umgestellt, da diese nach mehreren Untersuchungen als

¹²⁹ Vgl.: <http://www.welt.de/data/2005/07/06741776.html>

¹³⁰ Spiegel 28/2005: „Großer Erfolg für die Umwelt“, S.140

¹³¹ Vgl.: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.113ff; CSTEE=Scientific Committee for Toxicity, Ecotoxicity and Environment der EU

¹³² Vgl.: WWF (Hrsg.): „Gefahren für die menschliche Gesundheit durch hormonell wirksame Zusätze in Kunststoffprodukten“, S.16

¹³³ http://www.geoscience-online.de/index.php?cmd=wissen_details&id=3115&datum=2005-07-06

„ungefährlich“ eingestuft wurden. Für die Industrie war mit dieser Bewertung die Entscheidung für DINP und DIDP als Ersatzprodukte für DEHP gefallen. Jedoch zeigten andere Untersuchungen, die Umweltverbände durchführen ließen, auch schädliche Nebenwirkungen von DINP und DIDP (Schädigung von Leber und Nieren). Um die Unsicherheit nun vollständig aus dem Weg zu räumen, entschied man sich schließlich doch für ein Verbot auch dieser Phthalate. Angeblich liegen ausreichend genug Alternativen vor. Jedoch ist die Umstellung darauf für die Industrie wiederum mit einem Mehraufwand verbunden.

Der Verbraucherschutz stand bei der Entscheidung stark im Vordergrund. Sie kommt dem Sicherheitsbedürfnis der Öffentlichkeit entgegen und betont die schützenswerte Rolle der Kinder¹³⁴. Insofern ist die Entscheidung der EU zu begrüßen.

4.1.3. Gefahren bei der Verbrennung

PVC ist aufgrund seines hohen Chlorierungsgrades nur sehr schlecht brennbar. Behauptungen von Medien, PVC-Kabel hätten bei Großbränden wie „Zündschnüre“ gewirkt, müssen als falsch zurückgewiesen werden. Hart-PVC brennt unter Verkohlung mit grüner Flamme. Sobald die Zündquelle entfernt wird, erlischt es¹³⁵. Bei Weich-PVC kann das Brandverhalten aufgrund der unterschiedlichen Rezepturen von Zusätzen variieren. Jedoch wird auch hier durch Brandschutzmittel eine Brandausbreitung verhindert. Wie bei jedem Brand werden unterschiedliche Brandgase frei. Aufgrund des hohen Chlorierungsgrades, kommt es jedoch auch zur Bildung von chlororganischen Verbindungen, die, aufgrund ihrer toxischen Wirkung, als sehr bedenklich eingestuft werden müssen.

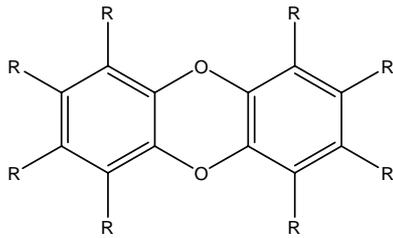
4.3.1.3. Dioxine und Dibenzofurane

Dioxin ist die systematische Bezeichnung für ein zweifach ungesättigtes sechsgliedriges Ringsystem mit zwei Sauerstoff-Atomen im Ring. Bei den toxikologisch bedenklichen Dioxinen handelt es sich um die polychlorierten Dibenzop-dioxine (PCDD)¹³⁶.

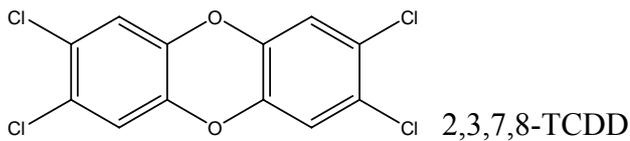
¹³⁴ Spiegel 28/2005: „Großer Erfolg für die Umwelt“, S.140

¹³⁵ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.75

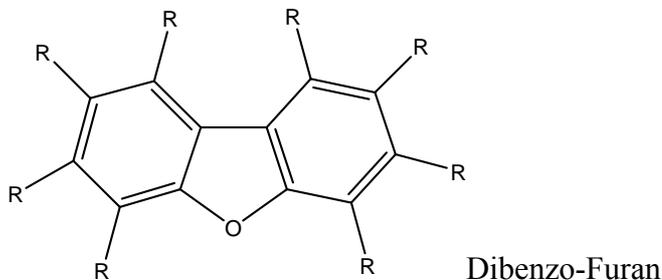
¹³⁶ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Dioxine



Zunächst sollte festgehalten werden, dass bei fast jedem Brand, auch bei Waldbränden, Dioxine freigesetzt werden¹³⁷. Das toxische Potential der Isomere variiert jedoch sehr stark¹³⁸. Das gefährlichste ist das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin (TCDD), auch „Seveso-Gift“ genannt.



Toxikologisch ebenfalls bedenklich sind die polychlorierten Dibenzofurane (PCDF).



Die Entstehung von Dioxinen und Dibenzofuranen beim Verbrennen von PVC ist umstritten, insbesondere, inwieweit erhöhte Dioxin-Emissionen bei Bränden mit dem PVC-Anteil zusammenhängen.

Die toxischen Auswirkungen machen sich folgendermaßen bemerkbar:

Bei akuter Exposition kommt es zu Schleimhautreizungen und weiteren unspezifischen Symptomen. Die Ansammlung der Dioxine erfolgt in Organismen im Körperfett und Muskeln¹³⁹. Bei sehr hohen Konzentrationen (ca. 166 mg/kg), z.B. bei Bränden von Industrieanlagen, kann es zu starkem Hautausschlag¹⁴⁰ kommen. Jedoch konnte auch nach vermehrter Exposition keine erhöhte Krebsrate festgestellt werden. PCDD werden daher als nicht genotoxisch¹⁴¹ bzw. nicht kanzerogen angesehen.

Jedoch wirken einige Dioxine in hoher Konzentration extrem toxisch. Bei Tierversuchen mit Nagetieren wurde ein NOEL von 1 ng von 2,3,7,8-TCDD pro kg und Tag festgestellt. Die tägliche Gesamtaufnahme an chlorierten Dibenzodioxinen

¹³⁷ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Dioxine

¹³⁸ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Dioxine

¹³⁹ Reichl, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.112

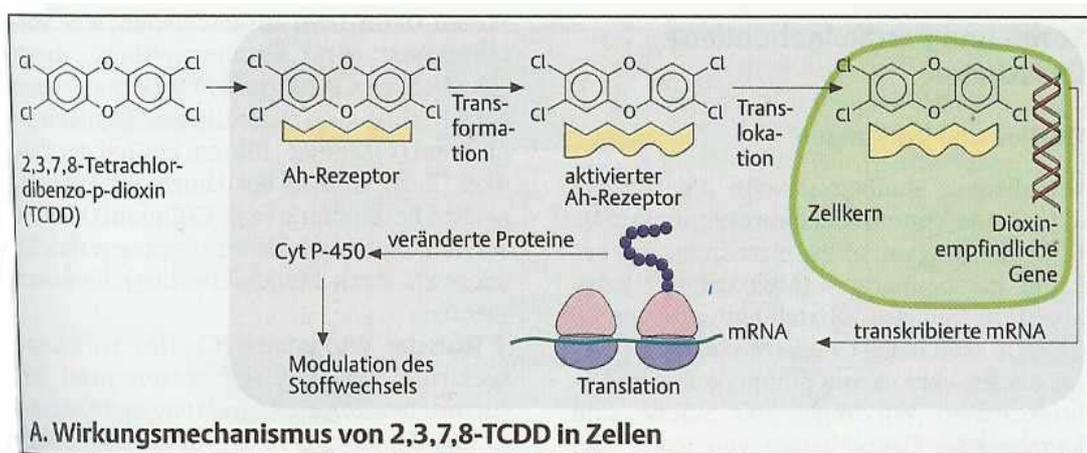
¹⁴⁰ Sogenannte „Chlorakne“

¹⁴¹ Reichl, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.114

liegt in den Industrieländern bei 0,1 ng TE/Mensch, die bei einer HWZ von 6 Jahren zu den tatsächlich gefundenen Dioxin-Gehalten im Körperfett von ca. 30 ppt TE führt¹⁴². Bei der gegenwärtigen Belastung der Normalbevölkerung sind daher keine gesundheitsschädlichen Beeinträchtigungen zu erwarten.

Die Aufnahme der Dioxine beim Menschen erfolgt hauptsächlich über Essen von fettreicher Nahrung. Die Halbwertszeit im Körper beträgt 5-7 Jahre. Auch Tiere nehmen Dioxine, die ubiquitär vorliegen, auf und reichern diese im Körperfett an. Damit gelangen sie in die Nahrungskette¹⁴³.

Der molekulare Wirkungsmechanismus kann folgendermaßen veranschaulicht werden:



aus: Reichl, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“

Dioxine treten mehrfach im PVC-Lebenszyklus auf:

Bei der Herstellung, Verarbeitung, beim Recyceln und Verbrennen. Im Brandfall wird das Dioxin zum großen Teil an Ruß gebunden, sodass für die Exponierten keine erhöhte Dioxin-Belastung zu erwarten ist. So wurde z.B. bei medizinischen Untersuchungen von Feuerwehrmännern keine erhöhte Dioxin-Konzentration festgestellt¹⁴⁴.

Sehr umstritten war lange Zeit die tatsächliche Korrelation von Dioxin-Konzentration und PVC-Anteil bei Bränden. Verschiedene Untersuchungen stellten fest, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen Dioxin-Konzentration und PVC-Anteil vorliegt. Neuere Untersuchungen der PVC-Industrie konnten diese Studien jedoch eindeutig widerlegen: Diese stellen fest, dass „PVC in der Müllverbrennung die Bildung von Dioxinen und Furanen nicht begünstigt“¹⁴⁵.

¹⁴² Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Dioxine

¹⁴³ Reichel, F.: „Taschenatlas der Toxikologie“, S.112

¹⁴⁴ AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.30

¹⁴⁵ AgPU (Hrsg.): „Kein weiterer Kostenfaktor“, Sonderdruck aus : Entsorga-Magazin 1-2/2002

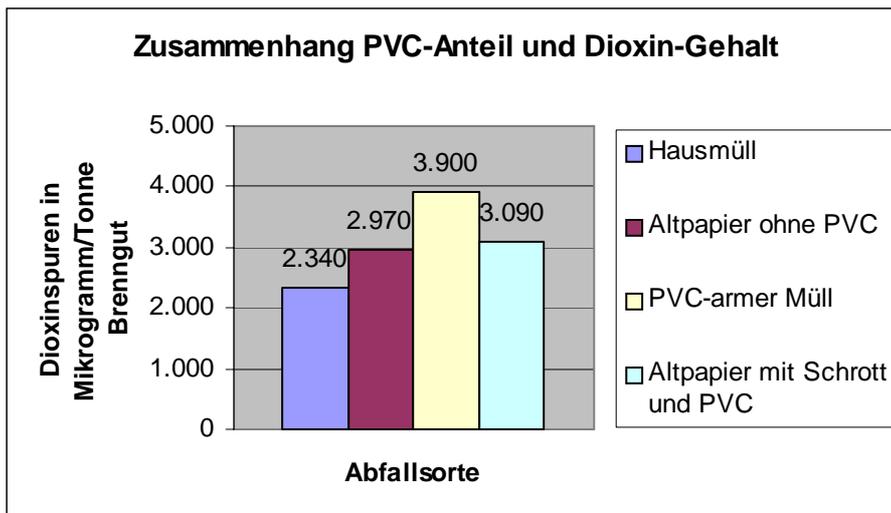


Tabelle 4.2

nach: Prof. Ballschmiter, Universität Ulm, aus: Menges, G.: „Recycling von Kunststoffen“

Im Bereich der Müllverbrennung lässt sich der Dioxin-Gehalt über Verbrennungsparameter wie Temperatur, Druck und Sauerstoff-Gehalt positiv beeinflussen.¹⁴⁶ So wurden nach diesen Ergebnissen die Verbrennungsparameter in den MVA's immer weiter optimiert ($T > 800^{\circ}\text{C}$, mäßiger O_2 -Überschuss), sodass die Dioxin-Konzentration bei der Müllverbrennung über die letzten Jahre deutlich gesunken ist.

Auch bei Unfällen mit Brandfolge konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, dass der PVC-Anteil für erhöhte Dioxin-Konzentration verantwortlich ist.

4.1.3.2. Weitere Brandgase

Die weitaus größere Gefahr, wie bei allen anderen Bränden kohlenstoffhaltiger Verbindungen auch, geht bei PVC-Bränden von dem entstehenden **Kohlenmonoxid (CO)** aus. CO hat eine 300-fach höhere Affinität zu zweiwertigem Eisen im Hämoglobin (Hb) als Sauerstoff¹⁴⁷. Es kommt also zur Bildung von COHb, das nicht mehr für den überlebenswichtigen Sauerstoff-Transport im Blut zur Verfügung steht. Zunächst können unspezifische Vergiftungserscheinungen auftreten und nach längerer Exposition kann der Tod durch Ersticken eintreten.

Ein für PVC charakteristisches Brandgas ist der Chlorwasserstoff (HCl). Während die CO-Konzentration sehr schnell wirksam wird und damit auch häufigste Todesursache bei Exposition von Brandgasen darstellt, wächst die HCl-Konzentration nur langsam

¹⁴⁶ Vgl.: Römpp: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Dioxine

¹⁴⁷ Greim, H.: „Toxikologie-Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner“, S.480f

an. Meist erkennt man sie frühzeitig an dem stechenden Geruch, noch bevor eine schädigende Wirkung eintritt¹⁴⁸.

HCl-Gas kann beim Einatmen bestimmter Konzentrationen zu Verätzungen der Atemwege, aufgrund der Bildung von Salzsäure im wässrigen Medium, führen. Zudem kann Salzsäure aufgrund der Luftfeuchtigkeit bzw. durch das Löschwasser entstehen und stark korrosiv auf die Bausubstanz wirken. Eine Reinigung erweist sich daraufhin als sehr schwierig. Man muss korrodierte Objekte weitgehend erneuern. Es kann also zu einem vermehrten Sanierungsaufwand bzw. Kosten aufgrund von Bränden mit PVC kommen¹⁴⁹.

Als weitere Emissionen beim Brandfall sind die als kritisch bewerteten Stabilisatoren Cadmium und Blei zu nennen, die sich aus der PVC-Matrix lösen können und in den gebildeten Feinstäuben absetzen. Aufgrund der Toxizität der Feinstäube sind diese gesondert zu behandeln und schwierig zu entsorgen. Daneben werden auch weitere aromatische polycyclische Kohlenwasserstoffe gebildet, deren toxisches Potential stark variieren kann.

4.2. Ökologische Bedenken

Der Begriff Ökologie ist eine aus dem Griechischen hergeleitete Bezeichnung von E. Hackel aus dem Jahr 1866 für die „Lehre vom Haushalt der Natur“¹⁵⁰. Ökologie betrifft nicht nur einen sparsamen Umgang mit Ressourcen, sondern auch eine an vielen Zielen orientierte Ökonomie der Natur. Man begreift die Ökologie heute daher als Umweltwissenschaft, die Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und Umwelt untersucht. Dabei erlangt man den Zugang über viele naturwissenschaftliche Disziplinen wie Biologie, Chemie, Toxikologie, Medizin und Geographie. Im Mittelpunkt der Ökologie steht das Ökosystem, eine funktionelle Einheit, die eine Lebensgemeinschaft von Organismen und ihrem Lebensraum umfasst¹⁵¹. Das Ökosystem muss dabei in einem gewissen Gleichgewicht gehalten werden. Der Mensch muss sich seinem Handeln mit und in der Umwelt bewusst sein und darf den Lebensraum nicht willkürlich beherrschen.

So besteht gerade auch im Umgang mit Kunststoffen die wichtige Frage nach den Folgen, die aus dem beschriebenen Kunststoff-Szenario für die Umwelt und das

¹⁴⁸ Vgl.: Greim, H.: „Toxikologie-Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner“, S.486

¹⁴⁹ Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.75

¹⁵⁰ Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Ökologie

¹⁵¹ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Ökologie

ökologische Gleichgewicht resultieren. Zum einen entsteht ein riesiger Müllberg, der nicht in den biologischen Kreislauf passt. Zum anderen wird die Umwelt bei der Produktion der Kunststoffe unterschiedlichen Zwischenprodukten ausgesetzt, die wiederum Auswirkungen auf das Ökosystem haben.

4.2.1. Umweltbelastung bei der Produktion

Nicht nur bei der Entsorgung von PVC fallen an einigen Stellen umweltschädliche Stoffe an. Auch die Produktion trägt durch Emissionen und Rückstände zur Umweltbelastung bei.

Bereits in den ersten Produktionsschritten treten diese auf. Bei der Chloralkalielektrolyse ist das Amalgam-Verfahren besonders zu beachten. Hier fallen geschätzt 3 g Quecksilber (im folgenden: Hg) pro Tonne Chlor an¹⁵². In modernen Anlagen sind diese diffusen Verluste jedoch weiter minimiert. Sie treten als Restgehalt in Produkten, in Abwasser und Abluft auf und schädigen so die Umwelt. Selbst wenn bei dem Prozess das Hg abgefiltert wird, kann es in den Deponien aus dem Filterschlamm wieder austreten. Allein im Jahr 1985 verursachte die Chlorproduktion nach dem Amalgam-Verfahren insgesamt eine geschätzte **Hg-Emission** von 5,5 t¹⁵³. Hg-Dämpfe können dabei stark toxische Reaktionen beim Menschen hervorrufen. Des Weiteren gelangt es über Hg-belastete Nahrungsmittel in den menschlichen Körper. Nach der Hg-Verordnung der Bundesregierung darf z.B. die Höchstmenge von 1 ppm bei Fischen nicht überschritten werden, um eine Schädigung beim Menschen zu verhindern¹⁵⁴. Die Abwässer müssen daher möglichst Hg-frei gehalten werden. Beim Diaphragma-Verfahren fallen schädliche Asbest-Abfälle an.

Zudem wurden bei der Chloralkalielektrolyse in den 70er Jahren erhöhte **Dioxin-Rückstände** im Anoden-Schlamm von den Graphit-Elektroden gefunden. Die Anoden-Schlämme stellen auch heute noch ein großes Altlasten-Problem dar. Es werden immer wieder PCDD-Kontaminationen der Böden festgestellt¹⁵⁵. Aus dem Produktions-Prozess werden die Dioxine, die bei der Produktion an mehreren Stellen auftreten, über Reaktions- und Abwässer, sowie über verbrauchte Katalysatoren oder Rückstände wie z.B. dem Anodenschlamm ausgeschleust.

¹⁵² Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs“, S.31

¹⁵³ Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs“, S.31

¹⁵⁴ Vgl.: Römpf: „Chemie Lexikon“, Stichwort: Quecksilber

¹⁵⁵ Vgl.: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.49ff

Bei der Untersuchung eines PVC-verarbeitenden Betriebs in Wilhelmshafen wurden die Klärschlämme untersucht, die sich als stark Dioxin-belastet herausstellten. Jedoch konstatieren auch unabhängige Beobachter, dass „der Beitrag der Chlorindustrie an der Gesamtemission von Dioxinen und Dibenzofuranen ungeklärt“¹⁵⁶ ist. Die **Chlor-Emission** selbst ist bei dem gesamten Produktionsverlauf sehr gering. Ein tatsächliches Austreten ist nur bei undichten Tanks bei Lagerung und Umschlag möglich. Grundsätzlich wird streng auf geschlossene Systeme geachtet. Die Abgaskonzentration bei der Produktion darf 5 mg/m^3 nicht überschreiten, dies entspricht $0,1 \text{ g/t}$ des erzeugten Chlors¹⁵⁷. Erhebliche Belastungen und Umweltgefahren gehen auf Unfälle beim Transport von Chlor zurück. Flüssiges Chlor wird nämlich in großen Mengen über Straße und Schiene transportiert. Die Sicherheit beim Transport muss daher möglichst streng eingehalten werden.

Auch die **Emission von VC** ist im Laufe der Jahrzehnte stark zurückgegangen, insbesondere nach dem Bekanntwerden der Kanzerogenität des Stoffes. Dies ist durch besonders rigide Vorschriften zur Entgasung erreicht worden. Die Polymerisation findet in geschlossenen Systemen statt. Die technische Richtkonzentration entspricht heute 2 ppm bzw. 5 mg/m^3 .¹⁵⁸ Bei der Verarbeitung können sehr geringe Konzentrationen von VC aus dem PVC freigesetzt werden. Diese sind jedoch so gering, dass sie für den Menschen unbedenklich sind. Außerdem werden sie relativ zügig (HWZ 2,4Tag) in der Atmosphäre durch Radikale abgebaut.

Um das Roh-PVC von größeren VC-Konzentrationen zu reinigen (Entmonomerisierung, Entgasung) wird es mit großen Mengen Luft durchgeblasen. Die hierbei entstehende Abluft ist nur schwer zu reinigen und enthält durchaus größere Mengen VC. Prinzipiell sind folgende Methoden zur Aufarbeitung vinylchloridhaltiger Abgase geeignet: Kondensation, Absorption, Adsorption und Verbrennung, sowohl thermisch als auch katalytisch. „Um über einen großen Konzentrationsbereich optimale Bedingungen realisieren zu können, werden üblicherweise zwei oder mehrere Verfahren kombiniert“¹⁵⁹. Damit wird der Austritt eines Großteils von VC verhindert. Die letztlich freigesetzten Monomere werden, wie beschrieben, in der Atmosphäre zersetzt¹⁶⁰. Bei der Weiterverarbeitung sinkt der Restgehalt VC im PVC weiter von $2\text{-}5 \text{ ppm}$ bis auf maximal $0,1 \text{ ppm}$. So sind für den

¹⁵⁶ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.49ff

¹⁵⁷ Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs“, S.31

¹⁵⁸ Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs“, S.31

¹⁵⁹ Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch 2/1 Polyvinylchlorid“, S.234ff

¹⁶⁰ Vgl.: Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffs“, S.36ff

Endverbraucher keine Gefahren zu erwarten. Die PVC-Produktionsbetriebe versuchen die Emissionsraten weiter zu minimieren und Lücken für mögliche Gefahren zu schließen.

4.2.2. Umweltbelastung bei der Anwendung

Wie bereits erwähnt, gehen von dem Polymer PVC selbst keine toxikologischen und auch ökologischen Gefahren aus. Auch ein Großteil der Additive, insbesondere die Stabilisatoren, Füllstoffe und Brandschutzmittel, bleiben während dem korrekten Gebrauch fest in der PVC-Matrix gebunden. Während der Anwendungsphase ist von den PVC-Produkten für die Umwelt somit keine schwerwiegende Belastung zu erwarten. Problematisch zu bewerten sind die Weichmacher, insbesondere die Phthalate, die nur durch physikalische Wechselwirkung in das PVC gebunden sind und durch Migration austreten können. Sie reichern sich in der Umwelt an und liegen dort mittlerweile ubiquitär vor. DEHP beispielsweise weist dabei eine hohe chronische Ökotoxizität gegenüber Wasserorganismen auf¹⁶¹. An dieser Stelle ist auch nochmals auf die toxikologischen Gefahren der Weichmacher hinzuweisen (siehe Punkt 4.1.2.2.). Weitaus problematischer ist ein möglicher Brandfall von PVC-Produkten zu bewerten, bei dem alle möglichen Additive und ihre Zersetzungsprodukte austreten und die Umwelt belasten können (siehe Punkt 4.1.3.). Grundsätzlich kommt die ökologische Problematik von PVC-Produkten bei der Entsorgung zum Tragen.

4.2.3. Entsorgung

Anfang der 80er Jahre türmte sich ein großer Müllberg von Kunststoffen in den Deponien auf. Man hatte es versäumt, eine umfassende Entsorgungsmöglichkeit für die in den Jahren zuvor massenhaft produzierten Kunststoffe einzurichten. Die Deponien waren dem Ansturm kaum gewachsen und die meisten künstlich hergestellten Produkte können zudem schlecht oder gar nicht biologisch abgebaut werden. Die dauerhafte Deponierung der Kunststoffe erwies sich als keine zukunftsweisende Lösung, da die Müllberge nur weiter anwachsen würden. Daher richtete man neue Anlagen ein, die eine Wiederverwertung bzw. -verwendung der Kunststoffe ermöglichten.

¹⁶¹ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.118

Die Entsorgungsstrategie wurde auf mehrere Gleise verteilt und fährt auch heute noch danach. Dabei haben sich aber die Gewichtungen der unterschiedlichen Entsorgungsstrategien stark verschoben. So trat z.B. 2005 ein komplettes Verbot der Deponierung von Kunststoffen auf Halden in Kraft, sodass die übrigen Verwertungsstrategien zwangsläufig enorme Zuwächse verzeichnen.

Es gibt grundsätzlich vier Entsorgungsmöglichkeiten¹⁶²:

- das werkstoffliche Recycling
- das rohstoffliche Recycling
- die Verbrennung (thermisches Recycling)
- und die Deponierung

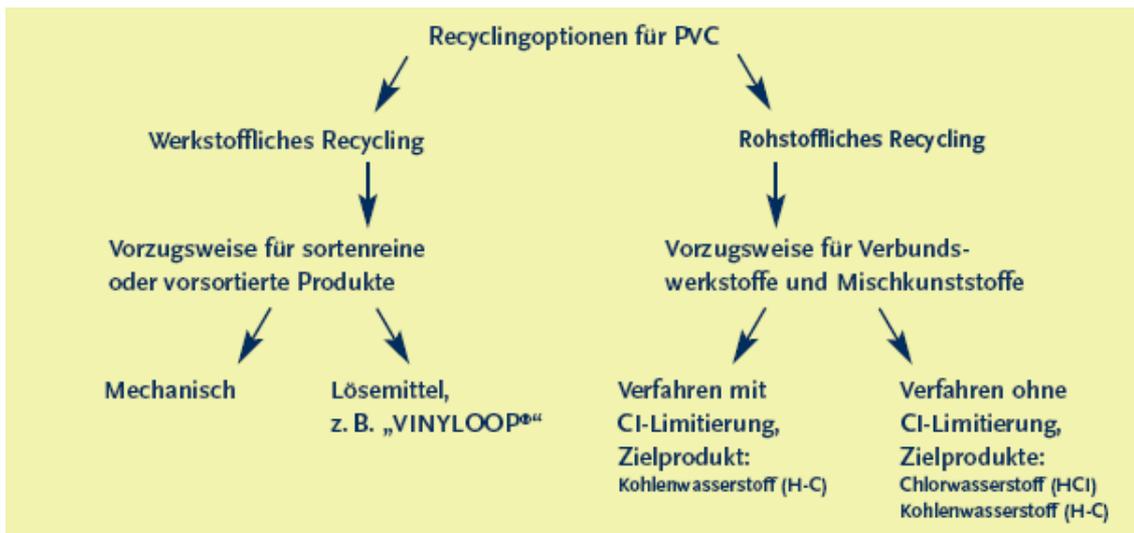
Folgende Tabelle zeigt die tatsächliche Aufteilung der Entsorgungswege von PVC-Produkten in Deutschland von 1993:

PVC Produkte	Berechnete Abfallmenge	Deponie	Müll-verbrennung	Werkstoffl. Recycling	DSD
Kabel	45000	25000	12000	8000	0
Weichfolien	71000	46000	23000	2000	0
Schläuche	22000-39000	15000-26000	7000-13000	0	0
Fußböden	66000	36000	18000	12000	0
Kunstleder	28000	19000	9000	0	0
Techn. Folien	15000	9000	4000	2000	0
Sonstige	10000-19000	7000-13000	3000-6000	0	0
Hartfolien	13000	9000	4000	0	0
Verpackung	100000	7000	3000	0	90000
Pharma	4000	1000	1000	2000	0
Platten	6000-10000	4000-7000	2000-3000	0	0
Rohre	14000	8000	4000	0	0
Fenster	17000	10000	5000	2000	0
Sonst. Profile	67000	45000	22000	0	0
Hohlkörper	8000	0	0	0	8000
Platten	31000	21000	10000	0	0
Sonst. Hart	80000	5000	3000	0	0
Sonst. Weich	26000	18000	9000	0	0
Summe	551000 – 581000	285000 – 305000	138000 – 148000	30000	98000

Tabelle 4.3; Aus: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“

Wann welche Recyclingoptionen gewählt werden können, wird im folgenden Schaubild deutlich:

¹⁶² Vgl.: Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.80



aus: AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“

Deutschland ist bei den heute recycelten Abfallmengen von PVC weltweit führend¹⁶³. Zudem werden neue verbesserte Pilotanlagen in Europa gebaut, die eine verbesserte und umweltfreundlichere Wiederverwertung ermöglichen. Die meisten dieser Anlagen arbeiten heute auch ökonomisch vielversprechend. Jedoch müssen die Verbraucher der PVC-Produkte finanziell von vornherein in die Recycling-Kosten mit eingebunden werden¹⁶⁴, um eine reale Rentabilität zu erreichen.

Die unterschiedlichen Verfahren sollen im folgenden ausführlich behandelt werden.

4.2.1.1. Werkstoffliches Recycling

Das werkstoffliche Recycling beruht darauf, dass die PVC-Abfälle nur mechanisch verarbeitet werden. Abfälle werden sortenrein gesammelt¹⁶⁵ und gereinigt. Dann werden sie durch Schreddern, Sieben und Kaltvermahlung zu neuer Pulverform¹⁶⁶ verarbeitet. Dieses kann durch Aufschmelzen bzw. Extrudieren zu neuen PVC-Granulaten bzw. -Produkten geformt werden. Die Qualität dieser Produkte ist dabei sehr unterschiedlich, je nachdem wie sortenrein die Abfälle vorlagen. Durch das Vermischen der unterschiedlichen PVC-Ausgangsprodukte kommt es zu einem Qualitätsverlust der neuen Produkte. Man spricht vom sogenannten „Downcycling“¹⁶⁷. Sollte die erhaltene Qualität erheblich vermindert sein, können aus dem gewonnenen Rohstoff nur noch einfache Produkte wie Straßenbremsschwellen

¹⁶³ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.10

¹⁶⁴ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.201

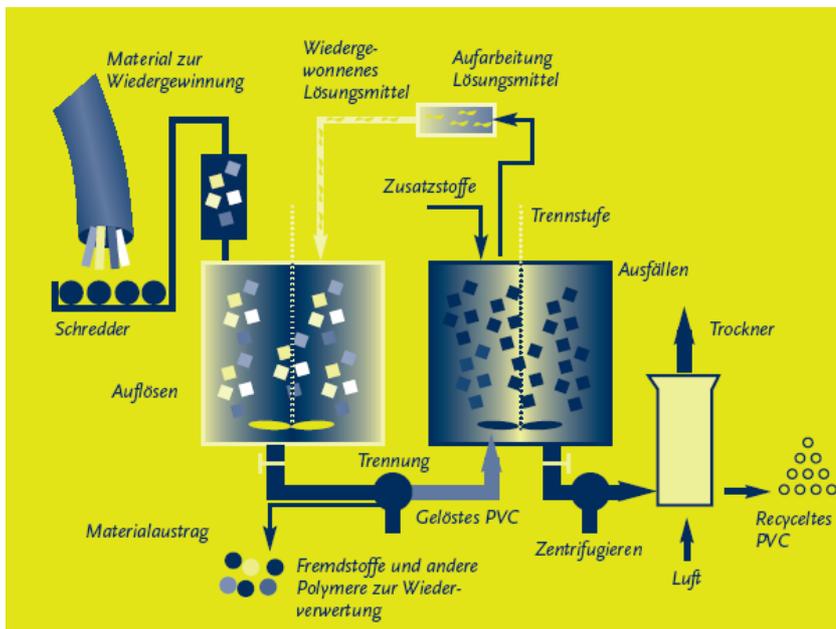
¹⁶⁵ Vgl.: Klemmer, G./Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“, S.191

¹⁶⁶ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.19

¹⁶⁷ Vgl.: Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.19

oder Blumentöpfe¹⁶⁸ gefertigt werden. Beim mechanischen Recycling bleiben die ökologisch problematischen Additive in der PVC-Matrix gebunden. Jedoch wird die endgültige Entsorgung z.B. der umweltschädlichen Schwermetalle nur weiter nach hinten verschoben.

Zur Zeit wird neben dem mechanischen Verfahren auch ein neues Lösemittel-Verfahren im werkstofflichen Bereich ausprobiert: Es handelt sich um das sogenannte „Vinyloop“[®]¹⁶⁹. Aufgrund der vollständigen Löslichkeit von PVC in bestimmten Lösemitteln kann eine weitgehend sortenreine Rückgewinnung des Roh-PVC erreicht werden¹⁷⁰. Das Verfahren lässt sich sehr gut schematisch darstellen:



aus: AgPU: „Recycling“

Seit Februar 2002 ist ein Pilotprojekt mit dieser Technologie in Italien im Betrieb. Weitere Anlagen in Westeuropa sind in Planung.

Insgesamt wurde im Jahr 1995 eine PVC-Gesamtabfallmenge von 683 Kilo-Tonnen (kt) ermittelt. Davon wurden 189 kt, das sind ca. 27%, werkstofflich recycelt¹⁷¹.

Unterscheidet man nach Post-Verbrauchern (=Kunden von PVC-Endprodukten) und Prä-Verbrauchern (=Unternehmen bzw. Verarbeiter von PVC) zeigt sich ein zweigeteiltes Bild:

Immerhin wurden in der EU bei den Prä-Verbrauchern fast 420.000 t, das sind 85%, der anfallenden Abfälle werkstofflich recycelt. Jedoch wurden bei den Post-Verbrauchern nur 100.000 t, das sind gerade mal 3% der Gesamt-PVC-Abfallmenge,

¹⁶⁸ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.19

¹⁶⁹ Vinyloop[®] untersteht SolVin, einem Tochterunternehmen von Solvay, BASF und weiteren Industriepartnern.

¹⁷⁰ Vgl.: AgPU (Hrsg.): „PVC-Recyceln problemlos: Vinyloop“

¹⁷¹ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.10

werkstofflich recycelt¹⁷². Aufgrund dieser ernüchternden Zahlen fordert die Europäische Kommission einen verstärkten Ausbau der Kapazitäten für das werkstoffliche Recycling, sodass bis 2010 mindestens 9% der Abfälle der Post-Verbraucher dort recycelt werden. Jedoch scheint es äußerst schwer zu sein, an die PVC-Abfälle der Post-Verbraucher zu gelangen. Die hauseigene Mülltonne scheint die einfachste Lösung zu sein. Immerhin gibt es beim werkstofflichen Recycling für fast alle wichtigen Produktbereiche Sammelsysteme, z.B. für Rohre, Fenster, Böden, Kabel und Dachbahnen. Als Beispiel sei die Rücknahme von Fenstern zur Wiederverwertung herausgegriffen: FREI (= Fenster Recycling Initiative). 1998 wurden 2500 t Alt-Fenster gesammelt und wiederverwertet. 1999 konnte eine Steigerung auf bereits 4000 t verzeichnet werden.

Eine schematische Darstellung einer werkstofflichen Recyclinganlage liegt als Anhang A bei. Es zeigt die Anlage der „Arbeitsgemeinschaft PVC und Recycling“ (AgPR) in Troisdorf, die sich mit dem Recycling von PVC-Böden beschäftigt.

Die Anlagen sind jedoch nicht weitflächig über Deutschland verteilt, sondern es ist heute nur jeweils eine Anlage im In- oder nahen Ausland vorhanden. So kommen zu den eigentlichen Recycling-Kosten noch hohe Transport-Kosten hinzu. Es ist fraglich, inwiefern dieser Aufwand rentabel ist. So wurde z.B. die Recycling-Anlage für Dachbahnen in Troisdorf 2004 geschlossen. Seitdem müssen die Abfälle zu Anlagen nach Dänemark und Nord-Italien gebracht werden. Einige Wege haben sich so verkürzt, andere hingegen stark verlängert. Es ist daher zu fragen, ob die Schließung der Anlage in Troisdorf unter wirtschaftlich / ökologischen Gründen sinnvoll war.

Immerhin gilt für das Jahr 2005 die freiwillige Selbstverpflichtung, zumindest bei Rohren und Fenstern, mindestens 50% werkstofflich zu recyceln¹⁷³.

4.2.1.2. Rohstoffliches Recycling

Das rohstoffliche Recycling bietet sich vor allem bei stark verschmutzten bzw. Misch-Kunststoffen an¹⁷⁴. Gerade dort hat diese Wiederverwertung Zukunft. Das Prinzip beruht darauf, die gesäuberten Produkte thermisch zu spalten und in HCl und

¹⁷² Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.19

¹⁷³ AgPU (Hrsg.): „Vinyl 2010“, S.8ff

¹⁷⁴ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.20

Synthesegas bzw. Rohöl zu zerlegen. Seit 2001 ist eine moderne Pilotanlage in Tavaux (Frankreich) in Betrieb¹⁷⁵.

Die Umsetzung des rohstofflichen Recyclings in den Anlagen läuft dabei wie folgt ab: Im Pyrolysereaktor wird bei 600°C der dehydrochlorierte Abfallstrom aufgespalten in Pyrolyseöl (Kohlenwasserstoffe) und in ein Feststoffgemisch bestehend aus Pyrolysekoks, Füllstoffen und Metallen. Das Pyrolyseöl gelangt zur Wiederverwertung in die petrochemische Industrie, das verbleibende Feststoffgemisch wird in weiteren Verfahren aufgearbeitet. Dabei wird versucht, die einzelnen Bestandteile schließlich wieder rein zu gewinnen. Auch hier bleiben noch Reste von Abfallprodukten zurück, die auf Deponien entsorgt werden müssen. Weitere Optionen im Bereich des rohstofflichen Recyclings werden zur Zeit untersucht. Dazu gehören ein Vergasungsverfahren zur Verwertung der Schredderleicht-Fractionen und Versuche zur Dehydrochlorierung aus gemischten Kunststoff-Abfällen. Grundsätzlich sind weitere, für Kunststoffe geeignete rohstoffliche Aufarbeitungsmethoden möglich, z.B. nasschemisch über Hydrolyse oder auch biochemisch. Dies funktioniert jedoch nur bei bestimmten abbaubaren Kunststoffsorten.

Da das rohstoffliche Recycling aufwendig ist, hat es einen „schweren Stand im Wettbewerb mit den anderen Technologien“¹⁷⁶. Es ist daher nur als Ergänzung zum werkstofflichen Recycling zu sehen.

4.2.1.3. Verbrennung

Die Verbrennung von Abfall wird auch als thermisches Recycling bezeichnet. Man gewinnt bei der Verbrennung von Stoffen thermische Energie und / oder Elektrizität. Es kommt also zu einer „Einsparung der natürlichen Ressourcen von Brennstoffen“¹⁷⁷. Jedoch ist die Rückgewinnung der Energie bei den vorhandenen Anlagen eher gering. Man rechnet mit einer durchschnittlichen Ausbeute von nur 20% der Herstellungsenergie¹⁷⁸. Im praktischen Verfahren werden die unterschiedlichen Müllarten nicht sortenrein verbrannt. Die Verbrennung findet in den kommunalen Müllverbrennungsanlagen (MVA) statt. Diese arbeiten mit einem Sauerstoff-Überschuss bei ca. 900°C¹⁷⁹. So werden durchschnittlich 600.000 t Müll

¹⁷⁵ Vgl.: AgPU (Hrsg.): „PVC-Recycling“, S.20

¹⁷⁶ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.25

¹⁷⁷ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.24

¹⁷⁸ Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.83

¹⁷⁹ Menges, G. (Hrsg.): „Recycling von Kunststoffen“, S.181ff

pro Jahr verbrannt. Bei dem eigentlichen Prozess handelt es sich um einen hoch technischen Vorgang, bei dem das Volumen des Mülls reduziert wird und hochmolekulare organische Stoffe weitgehend zu CO₂ und H₂O aufgespalten werden, wie bei jeder Verbrennung. Das Müllgewicht verringert sich somit auf bis zu 30%¹⁸⁰.

Zu den Hauptprodukten CO₂ und H₂O kommen jedoch noch gefährlicherer Flugstaub und ein Rest Schlacke hinzu. Die Abgase der MVA's müssen daher gründlich über ein Filtersystem gereinigt werden, um giftige und schädliche Flugstäube zu entfernen. Die Filter sind schließlich stark kontaminiert und müssen daher in speziellen Deponien entsorgt werden. Sie werden als „gefährlicher Abfall“ eingestuft (Richtlinie des europäischen Rates 94/904/EG), in denen auch Dioxine und Schwermetalle vorkommen¹⁸¹.

Zusätzlich fällt bei der Verbrennung von PVC auch HCl an. 50% des Chloreintrags in den MVA's sind auf PVC zurückzuführen. Dabei erzeugt 1 kg reines PVC ca. 580 g HCl¹⁸². In sogenannten Wäschern wird die HCl-Abluft entfernt, indem sie mit Wasser zu Salzsäure umgesetzt wird. Die entstandene Salzsäure muss mit Kalk oder CaOH (Calciumhydroxid) bzw. NaOH (Natronlauge) neutralisiert und schließlich als Feststoff deponiert werden.

Im Jahr 1995 wurden 165 kt PVC, das sind 24% der Gesamt-PVC-Abfallmenge, auf diesem Weg entsorgt¹⁸³. Leider landen auch immer wieder werkstofflich recycelbare Baustellenabfälle in den MVA's und werden so nicht optimal wiederverwertet.

Die Behauptung, PVC hätte Einfluss auf die Dioxinbildung bei der Verbrennung, kann durch verschiedene Studien (siehe Punkt 4.1.3.1.) widerlegt werden. Der Dioxingehalt wird bei den MVA's durch gezielte Einstellung der Verbrennungsparameter wie Druck, Temperatur und Sauerstoff-Gehalt sehr niedrig gehalten. Aufgrund spezieller Filteranlagen gelangen auch nur Spuren von Dioxin direkt in die Umwelt. Die Emissionsgrenzwerte liegen bei 0,1 mg/m³.

4.2.1.4. Deponien

Seit 2005 gilt ein Deponierungsverbot auf Halden von nicht vorbehandelten Abfällen. Darunter fallen ebenso die Kunststoffe und damit auch PVC. Mit diesem Verbot wollte man den anwachsenden Müllbergen und dem Preisdruck von sogenannten

¹⁸⁰ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.24

¹⁸¹ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.28

¹⁸² Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.83

¹⁸³ AgPU (Hrsg.): „PVC Recycling“, S.10

„Billig-Deponien“ Einhaltung gebieten. Zudem scheint die Wiederverwertung der organischen Abfälle, unabhängig von der Verwertungsstrategie, weitaus sinnvoller als die Deponierung. Bisher landeten ca. 50% der PVC-Abfälle auf den Deponien. Die genauen Angaben der Gutachten dazu schwanken je nach Auftraggeber. Die Kosten für diese Entsorgungsart waren bisher am günstigsten. Die Frage lautet, wie bzw. ob die übrigen Entsorgungsverfahren mit diesem starken Zuwachs fertig werden. Nach Angaben der AgPU stehen bei den Recyclinganlagen immer noch Kapazitäten zur Verfügung, sodass dort eine bessere Auslastung zu erwarten ist. Die Verbrennung ist aber wegen der Vermischung der unterschiedlichen Müllsorten die günstigere und einfachere Entsorgungsmethode, sodass der Großteil der PVC-Abfälle wohl in den MVA's landen wird.

In den kommenden Jahrzehnten ist ein enormer zusätzlicher Anstieg von PVC-Abfällen zu erwarten. In den 70er Jahren verzeichnete die PVC-Branche einen enormen Zuwachs von PVC-Werkstoffen. Die angelegte Verwendungsdauer liegt bei ca. 30 Jahren; sie wird jedoch häufig überschritten. Damit werden die damals verwendeten Werkstoffe wohl in der nächsten Zeit als Müll anfallen und müssen entsorgt werden. Nach dem „Baseline Szenario“ der Europäischen Kommission wird in der kommenden Zeit mit einer Zunahme von 30-80% des PVC-Mülls zu rechnen sein¹⁸⁴. Aufgrund der schärferen Deponie-Vorgaben muss das Recycling an Bedeutung gewinnen und vorhandene Kapazitäten müssen weiter ausgebaut werden. Die jährliche Deponierung des gesamten Mülls lag vor dem Inkrafttreten des Gesetzes von 2005 bei durchschnittlich 2,9 Mio Tonnen. Bisher wurden also mit Sicherheit mehrere Dutzend Millionen Tonnen deponiert¹⁸⁵.

Der Abbau der organischen Stoffe auf den Deponien beruht auf mikrobiellen Zersetzungs Vorgängen, die bis zu mehreren Jahrhunderten (anaerobe methanogene Phase) andauern kann. Der Ablauf des Zersetzungs Vorgangs ist dabei stark von dem Abfall selbst und den Wechselwirkungen der Parameter abhängig¹⁸⁶.

PVC ist gegenüber diesen Vorgängen jedoch weitgehend resistent und damit als dauerhaft bleibender Müll anzusehen. Ausnahmen bilden sehr dünne PVC-Verpackungsfolien. Das tatsächliche Langzeitverhalten auf den Deponien ist jedoch unklar, da man mit dem Produkt noch wenig Erfahrung in diesem Bereich hat. Bisher

¹⁸⁴ Vgl.: Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.18

¹⁸⁵ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.33ff

¹⁸⁶ Vgl.: Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.34

konnte der Austritt von HCl und VC nur in sehr geringen Mengen nachgewiesen werden. Diese sind jedoch für Mensch und Umwelt nicht bedenklich¹⁸⁷.

Sehr viel unsicherer ist die Situation der Additive zu bewerten. Grundsätzlich sind die Stabilisatoren fest in die PVC-Matrix gebunden und daher ist kein Austritt zu erwarten. Jedoch kann es beim Kontakt von PVC mit organischen Lösungsmitteln zu Quellerscheinungen¹⁸⁸ kommen. Dabei können auch die Stabilisatoren in die Umwelt freigesetzt werden und dort schädlich wirken. Die ohnehin nur durch physikalische Wechselwirkungen gebundenen Weichmacher treten mit der Zeit aus Weich-PVC aus und gelangen in die Umwelt. Insbesondere die Sickerflüssigkeiten der Deponien sind zum Teil stark belastet. Jedoch findet mit der Zeit ein Abbau der Phthalate in der Umwelt statt (HWZ unter Laborbedingungen einige Tage¹⁸⁹).

5. PVC – Wie geht's weiter? – Heute

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln hauptsächlich der Ist-Zustand der PVC-Produktion bzw. der Teilströme, sowie die Entsorgung beschrieben wurde, soll dieses Kapitel versuchen, eine Gesamtbilanz zum Produkt PVC zu erstellen und mögliche Verbesserungen aufzeigen.

5.1. Präventives Denken in der heutigen Gesellschaft

In den wirtschaftlichen Boom-Jahren schenkte man dem Bereich Ökologie weniger Beachtung als heute. Zudem fehlten ausgereifte analytische Methoden. Daher kam es zu Fehlentscheidungen im Bereich der Chemikalienbewertung und führte so zu ökologischen Schäden. Das wohl bekannteste Beispiel dafür ist die Produktion bzw. der Umgang mit FCKW's (Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe), die als Treibmittel verwendet wurden, bis sich herausstellte, dass sie die für Lebewesen wichtige Ozon-Schicht zerstören.

Aufgrund der begangenen Fehler und der teilweise problematischen Auswirkungen auf die Umwelt setzte sich ein präventives Denken in der Gesellschaft durch. Produkte und deren Stoffströme sollten von nun an einer sehr gründlichen und umfassenden Prüfung unterliegen. Das ökologische Gleichgewicht sollte nicht durch eine vorschnelle Entscheidung aus der Bahn geworfen werden. Diese Einstellung

¹⁸⁷ Vgl.: Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, S.34

¹⁸⁸ Graßmann, Gudrun: „PVC-Was verbirgt sich stofflich dahinter?“, S.82

¹⁸⁹ Der photooxidative Abbau wird jedoch in der Atmosphäre durch Adsorption an Aerosole verlangsamt.

fand einen breiten Konsens in der Gesellschaft, so auch bei Parteien und großen Teilen der Industrie. Die Frage lautete von nun an: „Wie weit muss bzw. soll die Prävention gehen?“. Die Industrie, Öko-Verbände und auch unabhängige wissenschaftliche Institute übernehmen seitdem alle einen großen Teil der Verantwortung, wenn es um die menschliche Gesundheit und die Umwelt geht, indem sie vielfältige Untersuchungen zu bedenklichen Produkten anstellen. Sicherlich gibt es auch in der Industrie „schwarze Schafe“, jedoch sollten diese durch gesetzliche Vorgaben und Sanktionen bekämpft werden, anstatt sie zum Anlass für Grabenkämpfe zwischen Industrie- und Öko-Verbänden zu nehmen. Die Politik nimmt die Prävention mittlerweile sogar so ernst, dass sie über die Forderungen von wissenschaftlichen Beurteilungen hinausgeht, um Zeichen für eine verbraucherfreundliche Politik zu setzen. So hat das EU-Parlament erst in diesem Jahr nicht nur den bedenklichen Weichmacher DEHP verboten, sondern direkt alle gebräuchlichen Phthalate, obwohl einige der betroffenen Produkte als unbedenklich eingestuft wurden¹⁹⁰. Für die Industrie war dies im ersten Moment eine sehr negative Entscheidung, da durch Medienberichte die Fakten oft verwischt, wenn nicht sogar absichtlich dramatisiert wurden. Medienberichten zu Folge waren plötzlich alle Phthalate krebserregend¹⁹¹, obwohl dies schon in früheren Untersuchungen eindeutig widerlegt worden war¹⁹². Außerdem muss nun nach neuen Produkten geforscht und in Alternativen investiert werden. Auf den zweiten Blick kann die Entscheidung für die Industrie jedoch auch einen positiven Effekt haben:

Der Verbraucher gewinnt mehr Vertrauen in die Produkte der chemischen Industrie, da er sich vor möglichen Folgen ausreichend geschützt fühlt. Zudem könnte der Slogan „Phthalat-frei“ einen Kaufanreiz bieten.

Um aber die gesamte Vielfalt der möglichen negativen Auswirkungen, die von Chemikalien ausgehen könnten, besser zu überblicken und daraufhin präventive Maßnahmen ergreifen zu können, musste von Seiten der Politik ein Rahmen geschaffen werden, der dies überhaupt ermöglichte.

So galt zunächst in Deutschland das Chemikaliengesetz¹⁹³, später setzte das eher uneinheitliche EU-Weissbuch zur Chemikalienpolitik die Maßstäbe. Im Zuge der europäischen Einigung wollte man ein möglichst einheitliches System schaffen, um

¹⁹⁰ Vgl.: Spiegel 28/2005: „Großer Erfolg für die Umwelt“, S.140

¹⁹¹ Vgl.: http://www.geoscience-online.de/index.php?cmd=wissen_details&id=3115&datum=2005-07-06

¹⁹² Vgl.: AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.25

¹⁹³ GdCh : „Chemikalienbewertung vor REACH“, in: Nachrichten aus der Chemie (53/Mai2005) S.570

bestehende Gefahren besser einordnen und zukünftige rechtzeitig erkennen zu können. Aus dieser Idee stammt das REACH-Programm der Europäischen Union.

5.1.1. Beispiel: Das REACH-Programm

Das Wort REACH steht nicht nur als Abkürzung für „Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals“ sondern auch für den englischen Begriff „to reach“ = „erreichen“¹⁹⁴. Mit dieser Idee hat sich die EU tatsächlich ein ehrgeiziges Ziel gesetzt, das es zu erreichen gibt. REACH stellt ein einheitliches System in Europa zur Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien¹⁹⁵ dar. Es gilt dabei für alle alten und neuen Stoffe der chemischen Industrie. Das neue Regelwerk soll durch diese Maßnahmen dem Schutz von Mensch und Umwelt dienen.

Vor REACH existierte bereits seit 2001 das EU-Weissbuch zur Chemikalienpolitik. Auch hier stand der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt im Mittelpunkt. Jedoch soll REACH sehr viel weitgehender und umfassender als sein Vorgänger ausfallen. Die Idee dazu wurde im Oktober 2003 von der europäischen Kommission¹⁹⁶ eingebracht. Die Motivation für ein neues Regelwerk war dabei sehr groß. Verschiedene Studien von Umweltverbänden (u.a. WWF) konnten bei Bluttests verschiedener Personen giftige Stoffe im Körper nachweisen, die auf eine Belastung durch bestimmte Chemikalien zurückzuführen waren. Zudem lagen unzureichende Grundinformationen von über 100.000 existierenden Altstoffen¹⁹⁷ vor, die mit REACH endlich erfasst werden sollen. Eine erste Einigung zu dem Gesetz wird bis Ende 2005 erwartet. Das Gesetz sieht dabei eine Zusammenarbeit von Industrie, Wissenschaft und Politik vor. Vor allem die chemische Industrie soll durch Konsultation bei den chemischen Produkten mit in den Prozess eingebunden werden¹⁹⁸. Daher fallen auch für die Betriebe Kosten an. Die Eigenbeteiligung wird von Seiten der Industrie auf ca. 7 Milliarden Euro, über 15 Jahre verteilt, geschätzt. Dies entspricht weniger als 1% des Jahresumsatzes der chemischen Industrie¹⁹⁹. Der Nutzen für die menschliche Gesundheit wird von Seiten der EU weitaus höher eingeschätzt. Im Bereich des Gesundheitssystems könnten grob geschätzt 50 Milliarden Euro eingespart werden. Zusätzlich wird ein Teil der Kosten für REACH

¹⁹⁴ Vgl.: Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

¹⁹⁵ Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

¹⁹⁶ http://europa.eu.int/comm/environment/news/efe/18/print_article_1919_de.htm

¹⁹⁷ Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

¹⁹⁸ Vgl.: http://europa.eu.int/comm/environment/news/efe/18/print_article_1919_de.htm

¹⁹⁹ Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

auch von der EU getragen. Sie beteiligt sich mit 2,8-5,2 Milliarden Euro über 11 Jahre verteilt. Das REACH-System sieht dabei folgende Punkte vor:

Zum einen soll eine Untersuchung und Registrierung von allen Produkten stattfinden, deren Produktion über 1 t/a übersteigt. Die Beschreibung ist dabei von den Unternehmen einzureichen und soll über Eigenschaften und Wirkung der Chemikalie Auskunft geben. Es handelt sich also um einen Grunddatensatz zur Beurteilung der Stoffe. Von dieser Regelung sind etwa 30.000 Stoffe betroffen. Bei Chemikalien mit einer Produktionsmenge von über 100 t/a soll eine systematische staatliche Evaluation stattfinden, die auch auf die Erkennung von langfristig schädigenden Wirkungen angelegt ist. Zusätzlich sollen bei besonders besorgniserregenden Hochrisikostoffen z.B. mit kanzerogener Wirkung neue Zulassungsverfahren eingesetzt werden²⁰⁰.

Die Umsetzung dieser Ideen bedeutet für alle Beteiligten eine Umstellung in der Anlaufphase. Es lassen sich natürlich eine große Zahl sowohl an Vorteilen als auch an Nachteilen zu dem REACH-Programm anführen:

Für REACH spricht, dass die Umweltvorsorge mehr ins Zentrum der Beurteilung von Chemikalien rückt, sodass Schäden auf die Umwelt verringert werden. Die Gesundheitsprävention für den Menschen ist ein weiterer positiver Aspekt. Durch diese beiden ersten Punkte würde die Glaubwürdigkeit der Industrie bei der Bevölkerung steigen. Die Haftungsrisiken der Industrie würden minimiert, da durch genaue vorhergehende Prüfung der Stoffe die Gefährlichkeit vorzeitig festgestellt würde. Auch gegenüber den Auslandsmärkten können Vorteile auftreten. So könnte der Slogan „Durch REACH geprüft“ zum Markennamen²⁰¹ bzw. Siegel für geprüfte Qualität werden und somit im Ausland für Anerkennung sorgen. Außerdem würden bei mehreren Produkten bzw. chemischen Stoffen neue Alternativen erarbeitet werden. Das Programm könnte also auch Innovationspotential schaffen.

Gegen REACH spricht, dass die primären Kosten für die Industrie zu hoch sein könnten und somit der Wettbewerb gegenüber nicht-europäischen Märkten verzerrt wäre. Auch die sekundären Kosten könnten zu hoch ausfallen. Dabei geht es um die indirekten Kosten, die bei einer Umstellung der Produktion aufgrund von REACH anfallen würden. Von der Industrie wird außerdem kritisiert, dass durch die

²⁰⁰ Vgl.: Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

²⁰¹ BUND: „Angst vor Innovation“, (1/2004), S.10

ausufernde Brüsseler Bürokratie die Innovation gehemmt würde²⁰². Außerdem sei das geistige Eigentum gefährdet, da die Betriebsgeheimnisse zu stark offen gelegt werden müssen. Der Mittelstand sei zudem durch den anfallenden zeitlichen Aufwand und die zusätzlichen Kosten überfordert. Um die Stoffe noch genauer zu untersuchen, müssten zudem wieder mehr Tierversuche eingesetzt werden²⁰³.

Die meisten Umweltverbände sehen in REACH klar die Vorteile überwiegen. Jedoch kritisieren sie, dass der erste Entwurf von REACH durch Einspruch der Wirtschaft, unter Beistand der nationalen Politik, stark abgeschwächt bzw. „verwässert“²⁰⁴ wurde. Den Öko-Verbänden gehen die neuen Gesetzesvorlagen nicht weit genug. Die Industrie bzw. die Chemiekonzerne konnten dem nachgebesserten Entwurf schließlich zustimmen.

Als Fazit zu dem anlaufendem REACH-System lässt sich festhalten, dass die Reform im ersten Moment natürlich zu einer direkten Belastung der Wirtschaft führt. Jedoch fällt diese relativ gering aus und das System birgt für innovative Unternehmen Vorteile²⁰⁵.

Für den Verbraucher ist das einheitliche „Überwachungssystem“ mit Sicherheit vorteilhaft. Zum einen steht der Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit für eine verbraucherfreundliche Politik. Zum anderen ist durch die Vereinheitlichung ein besserer und sicherer Überblick möglich. Für Roh-PVC sind keine grundlegenden Veränderungen durch REACH zu erwarten, da von reinem PVC keine direkten Gefahren ausgehen. Die Frage bleibt jedoch, inwiefern die Zusätze, insbesondere die Weichmacher, unter die neuen Beschränkungen fallen und somit eine Umstellung bei der Verarbeitung von Roh-PVC erfolgen muss.

5.2. Die Zukunft des PVC

5.2.1. Nachhaltige Entwicklung

Unter dem Begriff „Nachhaltigkeit“ oder auch „Nachhaltige Entwicklung“ ist die Untersuchung einzelner Stoffe und Produkte unter ökonomischen, ökologischen und, nach neuerem Verständnis, auch sozialen Gesichtspunkten zu verstehen. Die „Nachhaltige Entwicklung“ umfasst die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und

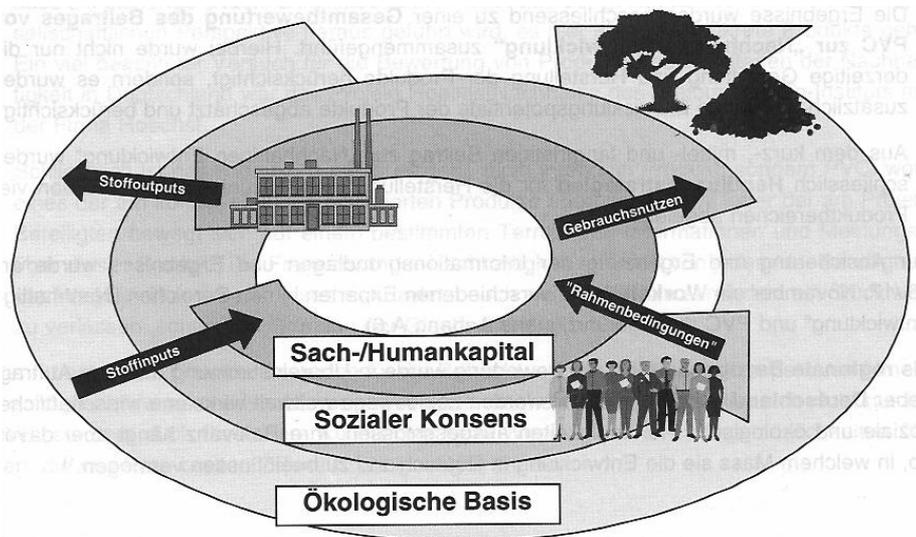
²⁰² Vgl.: Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

²⁰³ Vgl.: Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

²⁰⁴ BUND: „Besser Vorsorgen“, (1/2004), S.15

²⁰⁵ Nachrichten aus der Chemie: „REACH und die politische Entscheidungsfindung“ (53/Januar 2004)

Gesellschaft und betrachtet deren kurz-, mittel- und langfristiges Potential bzw. deren Auswirkungen. Zudem werden Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Dimensionen analysiert wie z.B. Produktströme und Dienstleistungswege:



aus: AgPU (Hrsg.): PVC und Nachhaltigkeit

Die Analyse soll auch im Vergleich zu alternativen Produkten geschehen. Von diesen Gesichtspunkten aus, soll eine Zusammenfassung erstellt und somit eine Gesamtbilanz eines Produktes „von der Wiege bis zur Bahre“²⁰⁶ angefertigt werden. Die angestrebte Betrachtung ist also sehr weitgreifend und tangiert viele Bereiche. In der Dimension „Ökologie“ müssen z.B. Energiebilanzen bei der gesamten Produktion (also in jedem einzelnen Produktionsschritt) erstellt werden. Aber auch Entsorgung, Emissionen und Ressourcenverbrauch zählen dazu. Jeder dieser erfassten Bereiche wird mit möglichen Konkurrenzprodukten verglichen. Aus der Gesamtbilanz sollen Schlussfolgerungen gezogen bzw. Handlungsempfehlungen gegeben werden.

Um jedoch eine solche Bilanz zu erstellen, ist es notwendig, Indikatoren anzulegen, die quantifizierbar sind²⁰⁷. Im Bereich „Wirtschaft“ scheint dies noch gut möglich. In der Ökologie wird es schon schwieriger festzulegen, was der Umwelt letztendlich mehr schadet. Besonders kompliziert wird es, wenn es um die Frage geht, was sozial ist. Mögliche Kriterien für Nachhaltigkeit im Bereich Ökologie sind z.B. die Verringerung des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen, Verringerung des Energieeinsatzes, Erhöhung der Gebrauchsfähigkeit, Minimierung von Emissionen

²⁰⁶ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.15

²⁰⁷ Vgl.: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“, S.55

oder sogar Ersatz durch biologisch abbaubare Stoffe²⁰⁸. Mögliche Instrumente zur Durchsetzung dieser Kriterien wären Rücknahme- und Rückgabeverpflichtungen durch den Staat, Erweiterung der Kennzeichnungspflicht und Verpflichtung zur Durchführung von regelmäßigen Umweltanalysen.

Die Nachhaltigkeit eines Produktes wird immer häufiger untersucht und von den Beteiligten als „ethische Verpflichtung“²⁰⁹ im Bezug auf natürliche Ressourcen, Regeneration von Umwelt und die zukünftige Generation gesehen.

5.2.1.1. Beispiel: Nachhaltigkeit Fenster

Eine umfassende Betrachtung der Nachhaltigkeit von PVC ist im Produktbereich „Fenster“ durchgeführt worden. Um eine ausgewogene „objektive“ Untersuchung garantieren zu können, wurde eine möglichst heterogene Projektgruppe zusammengestellt, die sich dem Thema „PVC und Nachhaltigkeit“ am Beispiel Fenster²¹⁰ widmen sollte. Darunter zählten Vertreter der Industrie, der Umweltverbände, der Medien und der Wissenschaft.

Dabei ging man wie folgt vor: Zunächst wurde geklärt, was unter Nachhaltigkeit zu verstehen ist und welche Indikatoren angewendet werden sollten. Im nächsten Schritt mussten konkrete Werte für die Nachhaltigkeitsindikatoren entworfen werden. Die gewonnenen Ergebnisse wurden zusammengefasst und sollten zu einer Gesamtbewertung des Produkts PVC-Fenster führen. Abschließend wurden Schlussfolgerungen aus den gewonnenen Ergebnissen gezogen und entsprechende Handlungsempfehlungen gegeben. Als Ausgangsbasis wurden die Datensätze von 1997 verwendet²¹¹:

In diesem Jahr wurden insgesamt 24,3 Millionen Fenstereinheiten produziert. Dabei betragen die Marktanteile 52% PVC, 27% Holz und 18% Aluminium. Weitere Alternativen wurden nicht betrachtet, da sie keine größere Bedeutung im Bausektor besitzen. Diese drei wichtigsten Fenster-Materialien wurden einer eingehenden Prüfung unterzogen und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Dabei wurden folgende Annahmen zur Bewertung zugrunde gelegt:

²⁰⁸ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.20ff

²⁰⁹ AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“, S.40

²¹⁰ Des weiteren wurden die Produkte „Rohre“, „Verpackungsfolien“ und „Kabel“ untersucht.

²¹¹ AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“, S.94

	<u>PVC-Fenster</u>	<u>Holz-Fenster</u>	<u>Alu-Fenster</u>
<u>Fenster Rahmen</u>	-1,65 x 1,3 m -zweiflügelig -Gewicht ohne Scheibe: 44kg, davon 26kg PVC-Profil	-1,65 x 1,3 m -zweiflügelig -Gewicht ohne Scheibe: 26kg, davon 20kg Holz-Profil	-1,65 x 1,3 m -zweiflügelig -Gewicht ohne Scheibe: 40kg, davon 28kg Alu- Profil
<u>Nutzungsdauer</u>	30 Jahre	30 Jahre	30 Jahre
<u>Stromverbrauch</u>	Strommix entsprechend Herkunft des PVC (Schweiz)	Strommix Europa (UCPTE)	Strommix entsprechend Herkunft des Alu (Schweiz)
<u>Anstriche</u>	- keine	-lösemittelhaltige Grundierung, Wasserbasisfüller und Lack -Wartung (30Jahre): 2Vollanstriche bzw. 5Anstriche mit Arbeitszeit von 3h pro Fenster	-keine
<u>Sekundärmaterial- Einsatz</u>	2% Sekundär PVC	-	35% Sekundär Alu
<u>Entsorgung</u>	70% Verwertung 30% Deponie und MVA	80% MVA, 10%Altholzfeuerung, 10% Deponie	85% Verwertung, 15% Deponie

Tabelle 5.1; Aus: AgPU (Hrsg.): PVC und Nachhaltigkeit

Diese Standardisierungen sind notwendig, um einen möglichst objektiven Vergleich der unterschiedlichen Werkstoffe durchzuführen. Im nächsten Schritt wurden die Nachhaltigkeitsindikatoren für die Betrachtung festgelegt. Die Indikatoren wurden dabei auf kurz- und langfristige Wirkung untersucht. Zur Bewertung der Produkte einigte man sich in diesem Fall auf folgende Indikatoren:

	<u>Indikatoren für kurzfristige Wirkungsketten</u>	<u>Indikatoren für langfristig kumulierende Wirkungsketten</u>
<u>Ökologische Nachhaltigkeits- indikatoren</u>	- Gesundheitsschädliche (Luft-) Emissionen - Ökotoxische Abwasseremissionen	- Beitrag zum Treibhauseffekt - Sommersmogpotential - Gewässerüberdüngung - Umwelt und Gesundheitsschädigung durch Stoffanreicherung
<u>Ökonomische Nachhaltigkeits- indikatoren</u>	- Außenhandelsabhängigkeit - Preisschwankungen auf den Beschaffungsmärkten - Preisdifferenz zu Konkurrenzprodukten	- Innovationsdynamik - Lohnkostenanteil / Arbeitsintensität - Verbrauch Energierohstoffe - Kosten Abfallentsorgung
<u>Soziale Nachhaltigkeits- indikatoren</u>	- Arbeitssicherheit - Beschäftigungsrisiko	- Berufskrankheiten - Import/Export: Einhaltung ethischer Standards - Politische Eingriffsempfindlichkeit

Tabelle 5.2; Aus: AgPU (Hrsg.): PVC und Nachhaltigkeit

Die Bewertung selbst wurde in vier Schritten durchgeführt:

1. Zunächst ermittelte man die wichtigsten Risiken für eine nachhaltige Entwicklung im Produktbereich. Hier handelt es sich um diejenigen Indikatoren, bei denen Nachteile gegenüber den Alternativen festgestellt wurden und suchte nach den Hauptursachen anhand der Detailergebnisse. Die Einzelergebnisse der Nachhaltigkeitsindikatoren für PVC-Fenster sind als Anhang B, C und D einsehbar. Dabei werden die positiven und negativen Abweichungen der Substitute von PVC angezeigt.
2. Im zweiten Schritt sollten die Entwicklungspotentiale, also die Möglichkeiten und Grenzen, beurteilt und Alternativen zur Verringerung der bestehenden Mängel anhand von Szenarien erarbeitet werden.
3. Im nächsten Schritt folgte die Bewertung der Entwicklungspotentiale von PVC und den Alternativen durch Gewichtung der verbleibenden Risiken.
4. Zum Schluss wurden die Bewertungen der kurz- und langfristigen Entwicklungspotentiale zusammengeführt und im „Nachhaltigkeitsportfolio“ positioniert. Dieses dient als Grundlage für die Ableitung von Handlungsstrategien.²¹²

Der gesamte Ablauf der Bewertungen wird anhand eines fiktiven Beispiels im Anhang E schematisch sehr gut verdeutlicht.

Die abschließenden Ergebnisse der Untersuchung der Nachhaltigkeit von PVC-Fenstern lässt sich in drei Bereiche gliedern: die positiven Beiträge, die nicht eindeutig positionierten Beiträge sowie die negativen Beiträge von PVC.

Zu den positiven Beiträgen zählten u.a.:

- die kurzfristigen ökonomischen Risiken durch den günstigen Systempreis
- die kurzfristigen sozialen Risiken durch die relativ geringe Häufigkeit von Arbeitsunfällen
- die langfristigen ökonomischen Risiken durch die geringen Lohnkostenanteile bzw. eine hohe Arbeitsproduktivität bei der Herstellung und den relativ geringen Verbrauch an Energierohstoffen.

Nicht eindeutig positioniert ist PVC u.a.:

- im Bereich der langfristigen ökonomischen Risiken bei der Innovationsdynamik (keine signifikante Differenz zwischen PVC, Holz und Alu)

²¹² Vgl.: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“, S.89

- im Bereich der langfristigen Umweltrisiken beim Beitrag zum Treibhauseffekt (keine signifikante Differenz zwischen PVC, Holz, Alu)

Negative Beiträge zeigte PVC u.a.:

- bei den langfristigen ökonomischen Risiken durch höhere Entsorgungskosten
- bei den kurzfristigen sozialen Risiken durch die geringe Arbeitsintensität (Beschäftigungswirksamkeit)
- bei den langfristigen Umweltrisiken durch potentielle Gefahren für Gesundheit und Umwelt durch Cd- und Pb-Stabilisatoren.

Als Abschluss wurde aus allen gelieferten Beiträgen folgendes Fazit festgehalten:

Es ergibt sich keine eindeutige Aussage zum Gesamtbeitrag von PVC-Fenstern zur Nachhaltigkeit²¹³. Es stellt sich daher das Problem der endgültigen Gewichtung der Einzelergebnisse.

5.2.1.2. Betrachtung ausgewählter Einzelbilanzen

Um die Nachhaltigkeit eines Stoffes angeben zu können, benötigt man zunächst eine Aufstellung der verschiedenen Einzelbilanzen. Unter den Einzelbilanzen versteht man verschiedene Prozessstufen und Stoffströme. Aus der Zusammenfassung der Einzelbilanzen lässt sich ein Gesamturteil abgeben, das die Nachhaltigkeit eines Stoffes beschreibt.

Im Folgenden soll die Betrachtung ausgewählter Einzelbilanzen des PVC exemplarisch erfolgen: zum einen die Energiebilanz des PVC selbst und zum anderen die Bewertung des Teilstroms der Blei-Stabilisatoren.

Die Energiebilanz von PVC

Bei der Energiebilanz werden alle Schritte einer Produktion betrachtet, bei denen Energie verbraucht wird. Beim PVC gehört die Herstellung des Vorprodukts Chlor, die Chloralkalielektrolyse, zu den energieaufwendigsten Prozessen. Ca. 25% des Energieverbrauchs der gesamten chemischen Industrie (1995 ca. 59 Mio MWh) entfallen auf die Chloralkalielektrolyse²¹⁴. Insofern erwartet man eine eher schlechte Energiebilanz für PVC. Betrachtet man aber die angegebenen Werte der Studie, schneidet PVC in der Summe überraschend gut ab.

²¹³ Vgl.: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“, S.145

²¹⁴ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.36

Produkte / Energieverbrauch [MJ/kg]	PVC	LDPE	HDPE	PP	PET
a) Prozessenergie	33,9	24,4	23,2	27,3	35,1
b) im Material gespeichert	17,2	43,7	44,4	43,7	49,1
Summe	51,1	68,1	67,6	71,0	84,5

Tabelle 5.3; Aus: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“,

Abkürzungen: LDPE (Polyethylen niedriger Dichte), HDPE (Polyethylen hoher Dichte), PP (Polypropylen), PET (Polyethylenterephthalat)

Aus: Studie „Ökobilanz von Packstoffen“ vom Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL) 1991

Die relativ günstige Energiebilanz für die Herstellung von PVC erklärt sich aus dem geringen Energieinput des Materials. NaCl (Kochsalz) geht in die Rechnung mit Null ein. Die Prozessenergie selbst ist aufgrund der Chloralkalielektrolyse relativ hoch. Jedoch lässt sich die Bilanz für PVC weiter verbessern, wenn das Membranverfahren zum Einsatz kommt. Dies benötigt 25% weniger Energie als das Amalgamverfahren²¹⁵. Die Prozessenergie würde auf 25,7 MJ/kg PVC herabsinken. Bei der Herstellung von Produkten aus Roh-PVC fallen 3-15 MJ/kg an. Dies entspricht derselben Größenordnung anderer Kunststoffe²¹⁶. Berücksichtigt man bei der Energiebilanz jedoch auch die mögliche Recycling-Energie-Gewinnung verändert sich das Bild:

In MJ/kg	PVC	LDPE	HDPE	PP	PET
Energieäquivalenzwert	51,1	68,1	67,6	71,0	84,5
Davon: PROZESS	33,9 ²⁾	24,4	23,3	27,3	35,1
MATERIAL	17,2	43,7	44,4	43,7	49,1
Verbrennungsgutschrift ¹⁾	12,0	30,6	31,1	30,6	34,4
Energiebilanz	39,1	37,5	36,5	40,4	50,1

Tabelle 5.4; Aus: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“

Nach: BUWAL-Studie 1991

- 1) Energieausnutzungsgrad des Kunststoffes 70%
- 2) Unter Berücksichtigung des Membranverfahrens nur 25,7MJ/kg.

²¹⁵ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.51

²¹⁶ UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.51, Nach: Kindler, H. 1980

Die Energiebilanzen der verschiedenen Kunststoffe werden so fast ausgeglichen. Es ergeben sich leichte Vorteile für die Polyolefine, die tendenziell mit der Erhöhung des Nutzungsgrades bei der Verbrennung vergrößert werden können. Für die Energiebilanzierung lassen sich folgende Schlussfolgerungen festhalten:

PVC zeigt im Vergleich zu den Polyolefinen leichte Vorteile bei der energetischen Betrachtung, wenn nur die Produktion eingerechnet wird. Diese werden jedoch kompensiert, wenn eine Verwertung via Verbrennung praktiziert wird. Die energetisch günstigere Verwertung von Alt-PVC ist das werkstoffliche Recycling unter der Voraussetzung, dass Sammel- und Aufbereitungsaufwand begrenzt sind.

Bewertung des Teilstroms „Blei-Stabilisatoren“²¹⁷

Bei der Bewertung eines Teilstroms werden zunächst der **Einsatz und die Emissionen** untersucht. Neben der Verwendung als Stabilisatoren bei PVC findet man Blei in vielen Produkten (u.a. Antiklopfmittel, Legierungen, Jagdschrot, Kabelmäntel oder Akkumulatoren). Als Stabilisatoren werden vor allem folgende Blei-Verbindungen verwendet: basische Bleisulfate, Bleiphosphit sowie Bleiphthalat, Bleifumarat und Bleisterat. Aus Statistiken (nach LGA 1991) ergab sich Ende der 80er ein Anteil für Blei-Stabilisatoren, der 20.000-25.000 t Blei entspricht²¹⁸. Der Verbrauch stieg über die Jahre enorm an, was auf die Substitution der Cadmium-Stabilisatoren zurückzuführen ist. Die gesamte Blei-Emission lag Mitte der 80er bei 4000 t/a. Aufgrund des Verbots von Blei als Antiklopfmittel konnten die Emissionen bis 1995 auf 800 t/a gesenkt werden. Dieser Trend hält weiter an und die Blei-Belastung der Umwelt nimmt weiter ab. Die Blei-Emission aufgrund des Einsatzes als Stabilisator bleibt eher gering, da es fest in die PVC-Matrix eingebunden ist. Jedoch können im Brandfall und bei der Entsorgung Blei-Verbindungen freigesetzt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis, insbesondere im Bezug auf die Entsorgung, werden Blei-Stabilisatoren nur noch in begrenztem Umfang eingesetzt.

Wirkungsprofil: Gesundheitliche Bewertung

Die täglich aufgenommene Pb-Menge schwankt zwischen 0,5-30 µg/kg und Tag durch Exposition (oral und inhalativ). Aus umweltmedizinischer Sicht sind chronische Wirkungen im Niedrigdosisbereich auf das Nerven- und Blutbildungssystem, sowie auf die Nieren relevant. Erste Funktionsstörungen können

²¹⁷ Vgl.: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.86ff

²¹⁸ Je nach untersuchendem Institut ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede zwischen den Produktionsmengenangaben.

schon bei einer Pb-Konzentration im Blut von 100 µg/l auftreten, bei Kindern entsprechend niedriger (60 µg/l). Die Erkrankungssymptome können sehr vielfältig sein, je nach Konzentration (Hörschwelle erhöht, IQ vermindert, Blutdruckanstieg u.v.m.). Die Pb-Belastung der durchschnittlichen Bevölkerung ist seit längerer Zeit stark rückläufig und liegt unter heutigen Bedingungen in einem unbedenklichen Konzentrationsbereich.

Wirkungsprofil: ökologische Bewertung

Gegenüber Umweltorganismen sind anorganische Pb-Verbindungen toxisch, wobei die tatsächliche Toxizität stark von den weiteren Umweltbedingungen abhängt (pH-Wert, Schwebstoffgehalt). In aquatischen Systemen ist Blei fast immer an Sedimente gebunden. Fische reagieren sehr empfindlich auf Pb-Salze in Gewässern. Eine akute Fischtoxizität tritt in hartem Wasser erst bei 100 µg/l auf, jedoch wurden NOEL-Werte im „Life-cycle-test“ bei Regenbogenforellen von 4-18 µg/l (je nach Gewässerhärte) festgestellt. Die von der Literatur genannten Zielvorgaben liegen bei 3,4 µg/l im Wasser und 100 mg/kg in Schwebstoffen. Damit wäre für Fische keine akute Gefahr zu erwarten. Jedoch ist zu beachten, dass Fische ein hohes Akkumulationspotential besitzen. Die Mittelwerte im Rhein lagen 1993 mit 2-4 µg/l im Bereich der vorgegebenen Richtwerte²¹⁹. Pflanzen nehmen geringe Mengen Blei aus dem Boden auf. Es ist dort stark an organische Substanz gebunden. Es wird aber fast nicht in oberirdische Pflanzenteile transportiert. Eine erhebliche Bioakkumulation ist nur bei Mikroorganismen bekannt, bei denen Blei in die Zellwand eingebaut werden kann. Pflanzen scheinen gegenüber Blei im Boden sehr tolerant zu sein (Ausnahme: Fichte). Nach Angaben der LABO von 1995 betragen die Pb-Belastungswerte in verschiedenen Boden-Arten 40-100 mg/kg. Zum Schutz Pb-empfindlicher Spezies wird daher zur Vermeidung anthropogen bedingter Pb-Belastungen geraten.

Bewertung:

Soweit man das Kriterium der Haltbarkeit (Stabilisator-Funktion) von PVC anlegt, schneiden Pb-Stabilisatoren sehr gut ab. Aufgrund der oben beschriebenen Risiken für Mensch und Umwelt, sollte jedoch in jedem Fall möglichst auf weniger bedenkliche Stoffe zurückgegriffen werden.

²¹⁹ Vgl.: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.92f

Alternativen:

Für PVC-Stabilisatoren gilt allgemein, dass Ca/Zn-Systeme am wenigsten bedenklich sind und daher in der Produktion bevorzugt eingesetzt werden sollten. Technische Umsetzungsschwierigkeiten bestehen zum Teil noch bei einigen Spezialanwendungen von PVC. Zudem ist die Langzeitstabilisierung noch nicht ausreichend geklärt. Weitere Produktalternativen werden angestrebt (siehe Punkt 5.2.).

Schlussfolgerungen:

Eine Substitution von Blei-Stabilisatoren ist technisch auf stofflicher Ebene möglich und daher auch anzustreben. Ca/Zn-Systeme stehen zur Verfügung und bieten eine bessere Vorsorge für Mensch und Umwelt. Folgende Forderungen werden in diesem Zusammenhang von den Umweltverbänden gestellt:

- Pflicht zur Kennzeichnung, um den Blei-Produktkreislauf geschlossen zu halten
- Durchsetzung der Verpflichtungen durch Gesetze auf nationaler bzw. europäischer (ev. sogar internationaler) Ebene
- Aufklärung der Verbraucher über Risiken, die bei Verwendung von Blei auftreten können

Diese Forderungen sind teilweise schon erfüllt. Eine Vorgabe an die Industrie sieht z.B. heute einen kompletten Ausstieg aus der Verwendung von Blei-Stabilisatoren bis 2015 vor²²⁰.

5.2.1.3. Allgemeine Bilanz zu PVC

Um eine abschließende Gesamtbilanz eines Stoffes, in diesem Fall PVC, abzugeben, ist eine Vielzahl möglicher Einzelbetrachtungen von Stoffströmen und „Lebensstationen“ notwendig. Diese können in ihrer Wertigkeit stark variieren und es ist nur schwer möglich ein abschließendes Gesamturteil wie „gut“ oder „schlecht“ zu fällen. Im Gegenteil: Es würde dem komplexen Gebilde dieses Produkts nicht gerecht werden. Es ist jedoch wichtig, die einzelnen Stoffströme zu betrachten und auch zu bewerten, um eventuelle Verbesserungen (Handlungsempfehlungen) durchzusetzen. Für PVC lässt sich unter diesen Annahmen folgendes Fazit ziehen:

Roh-PVC selbst ist toxikologisch und ökologisch unbedenklich unter der Voraussetzung, dass man bei der Entsorgung auf Recycling-Prozesse zurückgreift. Jedoch besteht bei einigen Teilströmen bzw. Produktionsstufen ein gewisses

²²⁰ Vinyl 2010: „Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie zur nachhaltigen Entwicklung“, S.7

Gefährdungspotential: So besteht bei der Produktion grundsätzlich die Gefahr der Emission von umweltbelastenden oder für den Menschen schädlichen Stoffen aufgrund von Unfällen oder Unachtsamkeit. Diese Gefahr besteht auch bei der Weiterverarbeitung. Die Stoffströme der Additive weisen an einigen Stellen, insbesondere bei der Entsorgung, ein Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt auf. Weitere Anstrengungen sind zu unternehmen, um mögliche Gefahren in den angesprochenen Bereichen zu verhindern.

5.1.2.4. Forderungen

Um die Umweltbelastungen und Risiken weiter zu senken und damit die Nachhaltigkeit von PVC zu verbessern, werden Forderungen von Politik und Verbänden an die PVC-Industrie gestellt. In einem ersten Schritt werden allgemeine Forderungen formuliert, die im Grunde an die gesamte Industrie gestellt werden können und für eine sicherere, umweltfreundlichere Produktion stehen. Die wichtigsten sollen im Folgenden stichpunktartig formuliert werden, um eine bessere Übersicht zu gewinnen:

- Recyclingorientiert denken
- Möglichst geschlossene Recyclingkreisläufe
- Verringerung des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen
- Erhöhung der Gebrauchsfähigkeit und Nutzungsdauer der Produkte
- Verbesserung der Verwertung
- Minimierung der Emissionen
- Verringerung der Komplexität von Stoffströmen, um eine bessere Übersicht zu erlangen
- Risikoreduktion von gefährlichen Stoffen
- Entwicklung und Einsatz von umweltverträglichen Alternativen²²¹

An die PVC-Industrie können weitere spezifische bzw. konkrete Handlungsempfehlungen gestellt werden. Dabei wird versucht in möglichst allen Bereichen eine Optimierung durchzusetzen. Auch hier sollen die wichtigsten Forderungen stichpunktartig aufgezählt werden:

Zur Chlorproduktion:

- Amalgamverfahren zügig herunterfahren, Ersatz durch Membranverfahren
- Entwicklung chlorfreier Ersatzprodukte

²²¹ Vgl.: UBA: „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.147ff

Zu den Additiven:

- Verbot von Cd-, Pb- und Organozinn-Stabilisatoren in Neu-PVC
- Weichmacher genau untersuchen und bei Bedenken zügig durch unbedenkliche Alternativen ersetzen
- Chlorparaffine als Flammschutzmittel abschaffen

Zur Produktion:

- Prozesse der Herstellung und Verarbeitung auf Dioxin-Emission untersuchen
- Stoffkreisläufe weiter verbessern (Systeme geschlossen halten)

Zum Recycling:

- Realistische Prognosen zu „Abfallmenge vs. Recyclingkapazitäten“ erstellen
- Kosten für Recycling auf Produktpreis aufschlagen (gesicherte Finanzierung)
- PVC-Beschichtungen (auf Holz oder Alu) abschaffen, da die spätere Abtrennung zu kompliziert ist
- Bessere Kennzeichnung der Produkte, um bessere Wiederverwertung und Verbraucherschutz garantieren zu können
- Recyclingquoten deutlich erhöhen

Die hier vorgestellten Handlungsempfehlungen stammen aus dem Jahr 1997²²². Sie sind teilweise bereits aufgegriffen und durchgesetzt worden, sodass sie zu einer Klärung bzw. Verbesserung der Nachhaltigkeit von PVC beigetragen haben. Weitere Schritte werden hoffentlich folgen...

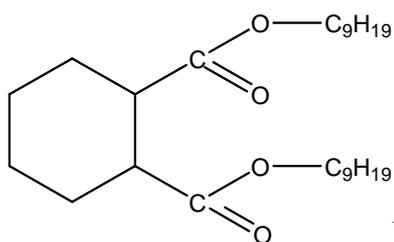
5.2.1.5. Alternativen

Wenn es um die Nachhaltigkeit von Produkten geht, wird auch immer ein Vergleich mit alternativen Produkten angestellt. Die Frage lautet nun, welche Alternativen es für die PVC-Produkte gibt und inwiefern diese tatsächlich bessere Voraussetzungen mit sich bringen. Die Alternativen müssen vor allem auch dem technischen Anwendungsbereich von PVC gerecht werden.

Die Öko-Verbände stellen eine ganze Reihe von Alternativen zu PVC in Aussicht. Bei der Betrachtung des Werkstoffs wird dabei hauptsächlich auf den Bereich Ökologie Wert gelegt, während ökonomische und soziale Auswirkungen vernachlässigt werden. Außerdem ist fraglich, ob alle genannten Alternativen ihren Anforderungen gerecht werden.

²²² Vgl.: Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.182ff

„Öko-Test“ beispielsweise fordert im Bezug auf PVC-Böden ganz konkret: „Weg damit“²²³ und empfiehlt grundsätzlich nur die alternativen Produkte. Der Grund dafür liegt in den verwendeten **Weichmachern** in PVC-Böden. Die Produkte erhielten daraufhin alle die Note „mangelhaft“ oder „ungenügend“. Nach Aussage von „Öko-Test“ ist der Weichmacher-Anteil in den Böden zu hoch und daher besteht für den Verbraucher Gefahr. Diese Aussage muss jedoch genau beleuchtet und daraufhin relativiert werden. Die Zeitschrift „Öko-Test“ geht bei ihren Untersuchungen grundsätzlich vom Weichmacher-Gehalt, also dem prozentualen Anteil im fertigen Produkt, aus. Dieser liegt bei Weich-PVC aber grundsätzlich relativ hoch mit 20-40%. Diese Feststellung ist für die Aussage über eine Gefährdung des Menschen jedoch unerheblich. Von Bedeutung ist die Migration aus dem Kunststoff. Und diese ist unter normalen Bedingungen für den erwachsenen Menschen völlig unbedenklich. Insofern wird mit den Bewertungskriterien dem Verbraucher eine falsche Schlussfolgerung vorgesetzt. Außerdem werden alle Phthalate in einen Topf geworfen, obwohl zwischen DEHP, dem tatsächlich fruchtschädigende Wirkung nachgewiesen werden konnte und DINP, bei dem dies nicht zutrifft, ein klarer Unterschied besteht. Um die kritisierten Phthalate zu ersetzen, bietet „Öko-Test“ unter Berufung auf das UBA, Weichmacher auf Basis von Zitronensäure, sogenannte Citrate, als Alternative an²²⁴. Jedoch sind diese in ihrer Wirkungsweise noch nicht so genau untersucht wie die Phthalate und benötigen daher weitere ausführliche Testphasen. In der Probephase sind z.Z. auch Adipate, so z.B. Cyclohexandicarbonsäureester (z.B.: DINCH) und Alkylsulfonsäureester (ASPE)²²⁵.



Auch hier ist die Erprobungsphase noch sehr jung, sodass weitere Forschungsaktivitäten eingeplant werden müssen. Es muss sichergestellt sein, dass von diesen Stoffen keine Gefahr für Mensch und/oder Umwelt ausgeht, damit neue Konfrontationen vermieden werden. Die Einführungsphase braucht seine Zeit, da die

²²³ Öko-Test: „PVC-Böden, Holzdekor, Weg damit“, 12/2004

²²⁴ Öko-Test: „PVC-Böden, Holzdekor, Weg damit“, 12/2004

²²⁵ Vgl.: UBA: „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.118

Verarbeitungsmethoden des PVC auch erst auf die neuen Stoffe eingestellt und optimiert werden müssen.

Da nach Ansicht der Öko-Verbände unter den heutigen Bedingungen eine grundsätzliche Gefahr von den **PVC-Fußböden** ausgeht, bieten sie eine ganze Reihe von alternativen Werkstoffen an²²⁶:

Zum einen Linolium-Böden: Diese bestehen aus pflanzlichem Leinöl und Naturharzen, also hauptsächlich Naturprodukten, und weisen auch eine gute Strapazierfähigkeit auf. Gummibeläge aus Naturkautschuk werden unter Vorbehalt empfohlen, da nach Aussage der Öko-Verbände auch dort gefährliche Zusätze verwendet werden können. Parkett-Böden aus Holz oder schlichte Holzböden werden auch angeführt. Sie besitzen eine lange Lebensdauer, da sie immer wieder durch Abschleifen erneuerbar sind. Sie sind gut wiederverwertbar und können das Raumklima regulieren. Dabei wird verschwiegen, dass die Holzböden, um eine gute Haltbarkeit zu erlangen, mit Anstrichen versehen werden müssen, die teilweise auch umweltbedenkliche Nebenwirkungen besitzen können. Außerdem bedeutet das regelmäßige Streichen einen zusätzlichen Aufwand. Auch Kork-Böden werden als möglicher Ersatz angeführt²²⁷.

PVC stellt zu den bisher vorgestellten Alternativen jedoch immer noch das günstigste Preis/Leistungs-Verhältnis dar. Selbstverständlich stehen auch Teppiche als möglicher Ersatz zur Verfügung. Diese zeigen jedoch im Bereich der Reinigung völlig andere Eigenschaften. Auch Fliesen bieten sich als Alternative an, unterscheiden sich jedoch auch deutlich, vor allem im Bezug auf die Trittschalldämmung. Zudem schneiden sie im Preis schlechter ab.

Eine Vielzahl möglicher Alternativen kann bei Fußbodenbelägen aufgelistet werden, jedoch zeigen diese teilweise auch Abweichungen von gewünschten Eigenschaften.

Bei **Fenstern** werden von den Öko-Verbänden ganz klar die Holz-Einheiten favorisiert²²⁸. Sie bieten bei richtigem Anstrich eine ähnlich lange Lebensdauer wie PVC-Produkte. Jedoch ist damit ein zusätzlicher Aufwand verbunden und die Anstriche sind nicht immer vorbehaltlos umweltfreundlich. Holz selber ist ein energiesparender nachwachsender Rohstoff, gut zu renovieren und damit ökologisch unbedenklich. Wird die Pflege jedoch vernachlässigt oder gar falsch durchgeführt, kann sich der Werkstoff verschlechtern und somit zu Mehrkosten führen. Alu wird

²²⁶ Vgl.: Greenpeace (Hrsg.): „Es geht auch ohne PVC“

²²⁷ Öko-Test: „PVC-Böden, Holzdekor, Weg damit“, 12/2004

²²⁸ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.156

aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Elektrolyse sogar von den meisten Öko-Verbänden eher kritisch beurteilt²²⁹.

Bei **Tapeten** verzeichnen PVC-Produkte seit 1990 zunehmende Marktanteile. Umweltfreundlichere Alternativen sind dagegen Raufasertapeten, die mit Naturharzen verklebt sind, sowie Naturfasertapeten. Sie erhalten daher auch den blauen Engel. Papiertapeten aus Holzstoff und/oder Altpapier sind eine weitere umweltfreundliche Möglichkeit.

Bei den **Rohren**, die den größten Anwendungsbereich von PVC darstellen, stehen auch Alternativen wie Stein, Guss, Kupfer oder Stahl zur Verfügung. Jedoch werden diese den Eigenschaften des PVC-Produkts nicht gerecht (siehe Punkt 3.1.2.) und bieten somit keine sinnvolle Alternative (eventuell für Spezialgebiete). Der Ersatz von PVC-Rohren durch Hochdruck PE-Rohre ist grundsätzlich möglich. Die PE-Alternative ist jedoch um rund 40% teurer²³⁰. Daher ist eine Substitution von PVC eher fragwürdig.

Auch bei **Kabeln** ist eine grundsätzliche Umstellung auf PE-Basis möglich. Jedoch müssen dafür die Herstellungsverfahren für Kabelummantelungen umgestellt und neue DIN-Werte bestimmt werden. Auch hier kommt es zu Preisaufschlägen von 30-40%.

Bei **Weichfolien** hatten sich lange Zeit PVC-Produkte im Markt gehalten. Inzwischen haben sich jedoch, insbesondere in der Verpackungsindustrie von Lebensmitteln, PE und PP durchgesetzt. Diese Polyolefine haben bei dieser Verwendung bessere Gebrauchseigenschaften und bessere Produktentsorgungskosten, wodurch ihre Gesamtbilanz auch besser ausfällt.

Grundsätzlich bleibt bei der Betrachtung der PVC-Alternativen zu sagen, dass eine möglichst genaue Untersuchung der Nachhaltigkeit der Produkte, also die Gesamtbilanz aller Alternativen, stattfinden sollte, anstatt ein einzelnes Produkt vorschnell zu „verteufeln“.

²²⁹ Vgl.: UBA (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, S.141

²³⁰ Pohle, Horst: „PVC und Umwelt“, S.140

6. Schluss: Zusammenfassung

PVC ist, wie in dieser Arbeit deutlich werden sollte, ein „Werkstoff nach Maß“²³¹. Er ist aufgrund seiner guten Verarbeitungseigenschaften vielseitig einsetzbar und begegnet uns daher an vielen Stellen im Alltag. Er erweist in vielen Bereichen einen guten Dienst. Daher ist eine grundsätzliche Substitution mit Sicherheit nicht sinnvoll. Außerdem ist der wirtschaftliche Aspekt von PVC nicht zu vernachlässigen: Der Ersatz von 70% der PVC-Produkte würde allein in Westdeutschland Zusatzkosten von ca. 3,3 Milliarden Euro bringen²³². Betrachtet man ausgewählte Produkte und prüft diese auf ihre Nachhaltigkeit, stellt man oft fest, dass PVC in weiten Teilen im Vergleich zu den Konkurrenzprodukten besser abschneidet. Warum von Seiten einiger Öko-Verbände dennoch eine strikte Ablehnung von PVC erfolgt („Es geht auch ohne PVC“, „Weg damit!“), bleibt fragwürdig.

Ein einfaches Gesamturteil zu fällen ist ohnehin sehr schwierig. PVC zeichnet sich in bestimmten Anwendungsbereichen durch eine Reihe von positiven Eigenschaften aus:

Es hat einen relativ geringen Energieverbrauch bei der Produktion im Vergleich zu den Konkurrenzprodukten. Es schont die Ressourcen, da es nur zu 43% aus Rohöl besteht. Die Weiterverarbeitung ist auch bei niedriger Temperatur möglich. Daher findet auch an dieser Stelle ein geringer Energieverbrauch statt. PVC zeichnet sich durch eine hohe Langlebigkeit (bis zu 100 Jahren) aus²³³.

Es besitzt vielfältige und für einen Werkstoff auch wichtige Eigenschaften: Es ist gut verarbeitbar, korrosionsfest und gut hygienisch zu reinigen. Aufgrund der vielfältigen Eigenschaften besitzt es auch ein hohes Innovationspotential. Selbstverständlich ist auch der niedrige Preis ein Argument für PVC. Außerdem ist PVC einer der bestuntersuchtesten Werkstoffe. Die möglichen Risiken sind daher bekannt und werden weiter minimiert. Alternativen sind eventuell weniger gut untersucht und können neue Gefahren aufweisen. So erklären die Vertreter der PVC-Branche, dass PVC „wegen seiner hervorragenden Kosten-Nutzen-Bilanz [...] nach wie vor weltweit ein Erfolgsprodukt“²³⁴ ist. Es ist nach PE noch immer der wichtigste Standardkunststoff.²³⁵

Jedoch treten nach wie vor auch immer noch einige negative Punkte in Erscheinung:

²³¹ Wagner, Fem.: „Kunststoffe in der Praxis“, S.1

²³² AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.38

²³³ Vgl.: KRV (Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“, S.3

²³⁴ AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.46

²³⁵ Tötsch, Walter: „Polyvinylchlorid-Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes“, S.1

Zum einen muss die Toxizität und Akkumulation einiger Vor- und Nebenprodukte bei Herstellung und Entsorgung erwähnt werden. Grundsätzlich besteht bei einem Unglücksfall die Möglichkeit der Freisetzung von Gefahrstoffen. Im Brandfall besteht die Gefahr durch freigesetzte Zersetzungsprodukte²³⁶. Die zuletzt angesprochenen Punkte gelten praktisch für jedes Produkt der chemischen Industrie.

Einer Klärung bedarf die Entsorgungsfrage des PVC: Wie kann eine möglichst optimale Wiederverwertung erreicht werden? In diesem Zusammenhang muss auch die langfristige Freisetzung der Additive beachtet werden.

Um die negativen Aspekte des PVC weitgehend aus dem Weg zu räumen, werden von Seiten der Politik und der Industrie verstärkt Anstrengungen unternommen:

Stoffkreisläufe, innerhalb der Produktion und beim Recycling, werden so weit wie möglich geschlossen²³⁷ und Gefahrenquellen minimiert. An diesem Vorsorgeansatz ist weiter festzuhalten und umweltfreundlichere Maßnahmen sind zu suchen. Außerdem müssen mögliche Gefahren für den Menschen rechtzeitig erkannt und beseitigt werden. Das Verbot der EU zu den Phthalaten, insbesondere zu DEHP, ist ein Beispiel für dieses Vorgehen. Es ist jedoch wünschenswert, dass solche Entscheidungen rechtzeitig und sinnvoll gefällt werden.

Um die gesamte beschriebene Diskussion auf einen Punkt zu bringen, sei das Stichwort „Nachhaltigkeit“ noch einmal erwähnt. Wenn versucht wird, die nachhaltige Entwicklung eines Produkts durchzusetzen, überwiegen grundsätzlich die Vorteile für den Großteil der Betroffenen. Da ökologische, ökonomische und soziale Maßstäbe gesetzt werden, steht somit eine umfassende Betrachtung im Vordergrund.

Auch die PVC-Branche hat sich dieser Entwicklung angeschlossen. Daher sagt auch das UBA über die PVC-Branche, dass diese „in den letzten Jahren bemerkenswerte Anstrengung zur ökologischen Modernisierung unternommen“²³⁸ hat. Dieser Weg soll weiter beschritten werden und insbesondere der Bereich Wiederverwertung bietet dafür einen wichtigen Ansatz. Die Forderung, das werkstoffliche Recycling weiter zu verstärken, wird immer wieder erhoben.

Die PVC-Branche legte sich im März 2000 eine „Selbstverpflichtung zur nachhaltigen Entwicklung“²³⁹ auf. Diese freiwillige Vereinbarung gilt für den Zeitraum 2000-2010 und wird daher auch „Vinyl 2010“ genannt. Darin gehen alle

²³⁶ Klemmer, G./ Hagemann, L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“, S.192

²³⁷ Vinyl 2010: „Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie zur nachhaltigen Entwicklung“, S.14

²³⁸ AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.43

²³⁹ Vinyl 2010: „Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie zur nachhaltigen Entwicklung“, S.2

Bereiche der PVC-Branche freiwillige Beschränkungen und Eingrenzungen von möglichen Risiken oder Belastungen ein: Beteiligt sind die ECVM (The European Council of Vinyl Manufacturers), ECPI (The European Council for Plasticisers and Intermediates), ESPA (The European Stabilisers Producers Association) und die EuPC (European Plastic Converters)²⁴⁰. Damit setzt sich die PVC-Branche selber Ziele, die teilweise ehrgeiziger sind als die Vorgaben des Gesetzgebers. Die Europäische Kommission strebt aus dieser Entwicklung den Versuch an, die freiwilligen und gesetzlichen Instrumente besser zu kombinieren²⁴¹.

PVC hat sich in der Diskussion um Nachhaltigkeit bewährt und stellt in vielen Bereichen einen sinnvollen Werkstoff dar. Die Enquete-Kommission „Mensch und Umwelt“ des Bundestages kommt daher auch zu der Feststellung, dass „ohne ökonomische und ökologische Begründung die Kommission die Substitution von PVC durch andere Produkte nicht empfehlen“²⁴² kann.

Aufgrund dieser Feststellungen und Ergebnisse bleibt zu hoffen, dass beim Thema PVC eine weitere Versachlichung der Diskussion stattfindet und keine „politisch-ideologischen“²⁴³ Grabenkämpfe zwischen Öko-Verbänden und Industrie geführt werden. Im Gegenteil:

Eine engere Zusammenarbeit ist wünschenswert, da gerade solche offenen Diskussionen zur nachhaltigen Entwicklung von PVC beitragen können.

²⁴⁰ Vinyl 2010: „Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie zur nachhaltigen Entwicklung“, S.24

²⁴¹ Europäische Kommission: „Grünbuch zur Umweltrelevanz von PVC“, S.36

²⁴² AgPU (Hrsg.): „Daten, Fakten, Perspektiven“, S.42

²⁴³ Klemmer, G./Hagemann L.: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“, S.192

7. Literaturangaben

AgPU (Hrsg.): „Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit“, Bonn 1998

AgPU (Hrsg.): „Fortschrittsbericht 2005 – PVC auf dem Weg zur Nachhaltigkeit“, Bonn 2005

AgPU (Hrsg.): „PVC in der Müllverbrennung“, PVC aktuell, Bonn 2001

AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit – Systemstabilität als Maßstab, Ausgewählte Produktsysteme im Vergleich“, Deutscher Instituts-Verlag, Köln 1999

AgPU (Hrsg.): „PVC: Daten, Fakten, Perspektiven“, Bonn 2003

AgPU (Hrsg.): „PVC: Recycling“ Die aktuelle Information, Bonn 1995

AgPU (Hrsg.): „PVC-Aktuell, Recycling / Volkswirtschaftliche Daten / Müllverbrennung“, Bonn 2000 / 2001

AgPU (Hrsg.): „PVC-Argumente“, 5.Auflage, Bonn 1993

AgPU (Hrsg.): „PVC-Recycling, Die Verwerterliste“, PVC aktuell, Bonn 2000

Becke, Joachim: „Leichtverständliche Einführung in die Kunststoffchemie“, Carl-Hanser-Verlag, München 1964

Becker, Gerhard / Braun, Dietrich, Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch – Polyvinylchlorid, Band 1“, 2.Auflage, Hanser Verlag, München 1986

Becker, Gerhard / Braun, Dietrich, Felger, Hans (Hrsg.): „Kunststoff Handbuch – Polyvinylchlorid, Band 2“, 2.Auflage, Hanser Verlag, München 1986

Biederbick, K.: „Kunststoffe – kurz und bündig“, Vogel-Verlag, Würzburg 1965

Bunke, Dirk / Holleben von, Horst: „Das EU-Weißbuch und die Verarbeiter von Chemikalien“, in: Nachrichten aus der Chemie, Juli 2003

Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hrsg.): „MAK- und BAT-Werte-Liste 2004“, Mitteilung 40, Wiley-VCH, Weinheim 2004

Dominghaus, Hans: „Kunststoffe I, Aufbau und Eigenschaften – Kunststoffsorten – Anwendungen“, VDI-Taschenbücher T7, VDI-Verlag, Düsseldorf 1969

Dominghaus, Hans: „Kunststoffe II, Kunststoffverarbeitung“, VDI-Taschenbücher T7, VDI-Verlag, Düsseldorf 1969

Dominghaus, Hans: „Werkstoffe aus der Retorte – Kunststoffe im Vormarsch“, Umschau-Verlag, Frankfurt a.M. 1969

- Emsley, John: „Parfum, Portwein, PVC – Chemie im Alltag“, Wiley-VCH, Weinheim 1997
- Fachverband der Kunststoffindustrie (Hrsg.): „PVC im Rohrbereich“, 7.Auflage 2002
- Falbe, Jürgen / Regitz, Manfred: „CD Römpp Chemie-Lexikon“, Version 2.00, Thieme Verlag, Stuttgart 1995
- Fraunhofer Institut Chemische Technologie (Hrsg.): „Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid“, PlasticsEurope Deutschland e.V., Pfinztal, 2005
- Graßmann, Gudrun: PVC: „Was verbirgt sich dahinter? – Ein Thema für den alltagsbezogenen Chemieunterricht“, Bonn 1999
- Greenpeace (Hrsg.): „Es geht auch ohne PVC – Alternativen“, o.O., o.J.
- Greim, Helmut, Deml, Erhard: „Toxikologie – Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Mediziner“, VCH Verlag, Weinheim 1996
- Greim, Helmut: „Chemikalienbewertung vor REACH“, in: Nachrichten aus der Chemie, Mai 2005
- Hagemann, Lydia: „Chancen und Risiken der Chlorchemie“, Bonn 1992
- Hildenbrand, Gebhard: „Chemie der Kunst- und Farbstoffe“, Herder Verlag, Freiburg 1976
- Informationszeitschrift „Kein Freispruch für PVC“, Bundesverband „Die Verbraucher Initiative“, Bonn 1996
- Klemmer, Gernot / Hagemann, Lydia: „Aktualität im Chemieunterricht: Chlorchemie wohin? Der Fall PVC“, in: chimica didactica, Zeitschrift für Didaktik der Chemie, Buck,P./Dahlmann, W.(Hrsg.), 21.Jahrgang 1995, Heft 3/Nr.70
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft: „Grünbuch zur Umweltproblematik von PVC“, Brüssel 2000
- Kummer, Beate: „PVC: Ein Werkstoff mit oder ohne Zukunft?“, bvse-recyconsult GmbH (Hrsg.), Bonn 1996
- Kunststoff-Museums-Verein (KMV) e.V. (Hrsg.): „Die Kunststoff-Macher“, Düsseldorf 2004
- Lahl, Uwe „REACH und die politische Entscheidungsfindung“, in: Nachrichten aus der Chemie, Januar 2004
- Leetz, Anja: „REACH – Besser vorsorgen“, in: BUND, 1/2004
- Löhr, Katja: „Umweltbildung und Chemieunterricht am Beispiel PVC“, Bonn 1997
- Menges, G. (Hrsg.): „Recycling von Kunststoffen“, Hanser Verlag, München 1992

- Öko-Test (Hrsg.): „PVC-Böden, Holzdekor, Weg damit“, 12/2004
- Öko-Test (Hrsg.): „PVC-Fussböden – Sondermüll im Haus“, 5/2000
- Öko-Test (Hrsg.): „Quietsch- und Badetierte - Gefahr für Kinder“, 5/ 2000
- Öko-Test (Hrsg.): „Wasserspielzeug“, 7/2004
- Pohle, Horst: „PVC und Umwelt – Eine Bestandsaufnahme“, Springer Verlag, Berlin 1997
- Produktinformation PVC, Ausgabe 1-5, PVC-Plus, Initiative der PVC-Branche, o.O., o.J.
- Reichl, Franz-Xavier: „Taschenatlas der Toxikologie – Substanzen, Wirkungen, Umwelt“, 2.Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart 2002
- Rungert, Franz: „Einführung in die Chemie und Technologie der Kunststoffe“, Akademie-Verlag, Berlin 1976
- Tötsch / Gaensslen: „Polyvinylchlorid – Zur Umweltrelevanz eines Standardkunststoffes“, Reihe Umweltschutz-Technik, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1990
- Umweltbundesamt (Hrsg.): „Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“, Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999
- Verband Kunststoffherstellende Industrie E.V.: „Argumente: Kunststoff und Weichmacher“, Frankfurt a.M. 2004
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): „Aufarbeiten von PVC, Ingenieurwissen“, 2.Auflage, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1997
- Vinyl 2010 (Hrsg.): „Progress Report 2005“, Brussels – Belgium 2005
- Vinyl 2010 (Hrsg.): „Freiwillige Selbstverpflichtung der PVC-Industrie zur nachhaltigen Entwicklung“, Brussels – Belgium Oktober 2001
- Vollhart: „Organische Chemie“, 3.Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2000
- Wagner, Fern.: „Kunststoffe in der Praxis“, Girardet Verlag, Essen 1976
- WWF (Hrsg.): „Gefahren für die menschliche Gesundheit durch hormonell wirksame Zusätze in Kunststoffprodukten – Flammschutzmittel, Weichmacher und Organozinnverbindungen“, WWF Deutschland, Frankfurt a.M. 2000
- Zahrnt, Angelika: „Angst vor Innovation“, in: BUND, 1/2004

Internetliteratur

Umwelt für Europäer: „Sicherheit von Chemikalien“

http://europa.eu.int/comm/environment/news/efe/18/print_article_1919_de.htm
am 27.05.2005 um 12.43Uhr

Greenpeace, Die Fakten: „Jahresrückblick 1996“

http://archiv.greenpeace.de/GP_DOK_PT/PUB_ALLG/C01AL06.HTM
am 28.06.2005 um 12.56Uhr

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/pvc.htm>

am 28.06.2005 um 13.25Uhr

„Kunststoffe im Alltag“

<http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/polyvinylchlorid.htm>
am 20.05.2005 um 10.12Uhr

<http://www.welt.de/data/2005/07/06741776.html>; am 10.7.2005 um 11.34Uhr

http://www.handelsblatt.com/hbiwwangebot/fn/relhib/sfn/builbhbi/cn/bp_artikel/docid/923384/STRUCID/200013/PAGEID/20051/

am 10.7.2005 um 11.37Uhr

Geoscience-online: „Weichmacher in Kinderspielzeug verboten“

http://www.geoscience-online.de/index.php?cmd=wissen_details&id=3115&datum=2005-07-06; am 10.7.2005 um 11.45Uhr

<http://de.wikipedia.org/wiki/PVC>; am 14.6.2005 um 10.23Uhr

Fotos

Staudinger: http://www.chemie.uni-freiburg.de/makro/index_e.html

Klatte: <http://www.plastiquarian.com/klatte.htm>

Rohre: <http://www.wittrock-holzbau.de/holzfachhandel/details/kanalrohre.htm>

Fenster: http://www.ipm-schober.com/Deutsch/ger_kunststoff-alu.htm

Böden: <http://www.sign-lang.uni-hamburg.de/HLEX/Legende/L5/L561.htm>

Kabelummantlung: <http://www.maaselectro.nl/images/artikel/5621.JPG>

Aktenordner: <http://www.betweenborders.com/usscreenplays/>

PVC-Ente: http://www.familienwelt.at/fotowbw/img_baby/small/118.jpg

Extruder: <http://home.hetnet.nl/~t-loontjens/extruder.JPG>

Kalander: <http://www.peterlutz.ch/lernen/werkstoff/kunststoffe/mkun5a.html>

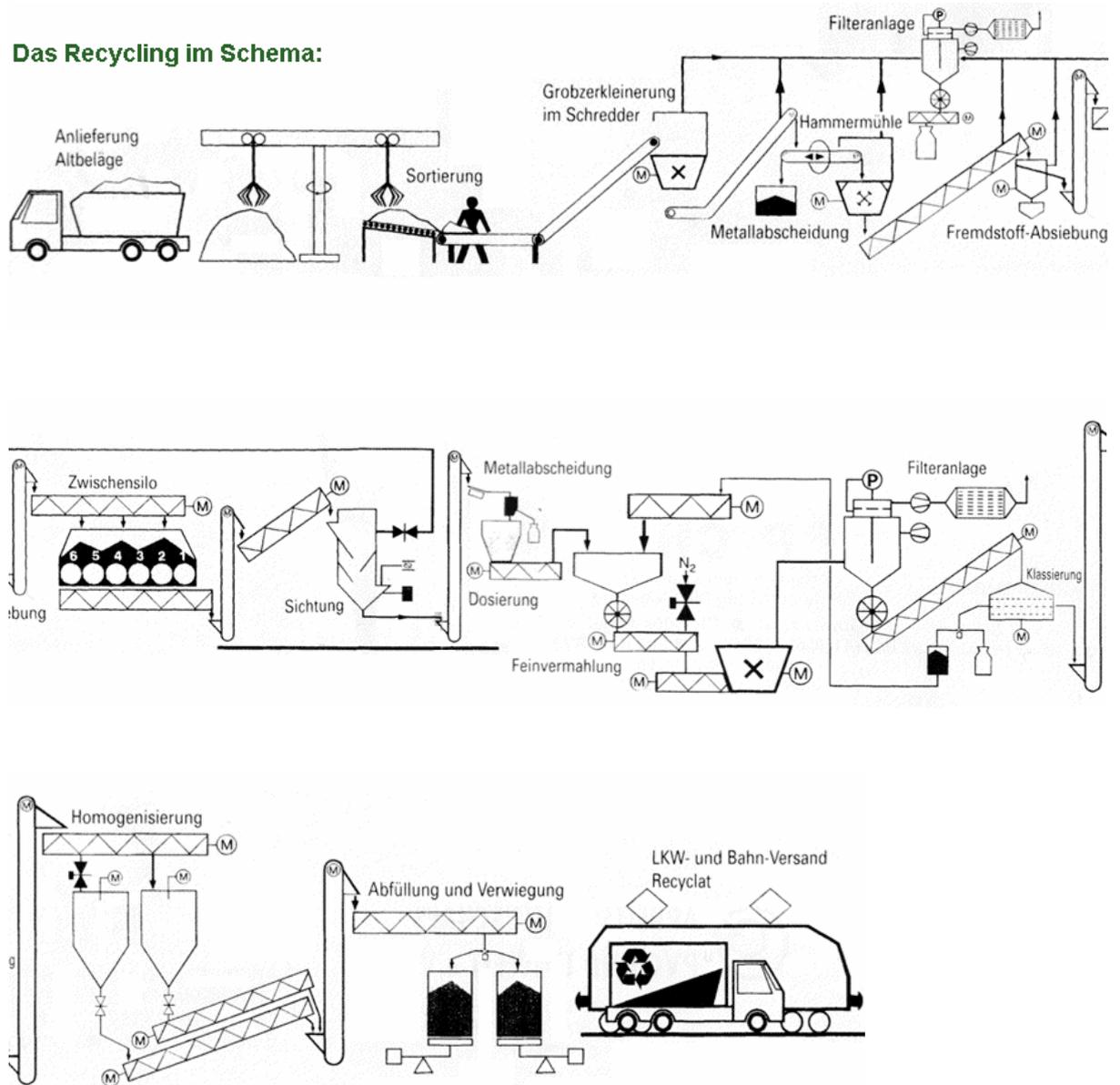
8. Abkürzungen

ADI	= acceptable daily intake
AgPU	= Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt
BLAU	= Bund-Länder Arbeitskreis Umweltchemikalien
CO	= Kohlenmonoxid
DEHP	= Di-(2-ethylhexyl)-phthalat
DIDP	= Diisodecylphthalat
DINP	= Diisononylphthalat
DSD	= Duales System Deutschland
EG	= Europäische Gemeinschaft
HCl	= Chlorwasserstoff
HWZ	= Halbwertszeit
IUPAC	= International Union of Pure and Applied Chemistry
jato	= Tonnen pro Jahr
kt	= Kilotonnen
LABO	= Länderarbeitsgemeinschaft Boden
LGA	= Landesgewerbeanstalt Bayern
MAK	= maximale Arbeitsplatzkonzentration
mg	= milli gramm (10^{-3} g)
MJ	= Mega Joule (10^6 J)
MVA	= Müllverbrennungsanlage
ng	= nano gramm (10^{-9} g)
NOEL	= No observed effect level
PCDD / PCDF	= polychlorierte Dibenzodioxine / polychlorierte Dibenzofurane
PE	= Polyethylen
PP	= Polypropylen
ppm	= parts per million
ppt	= parts per trillion
REACH	= Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals
TCDD	= 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin
TE	= Toxisches Äquivalent
TRK	= technische Richtkonzentration
UBA	= Umweltbundesamt
VC	= Vinylchlorid
µg	= mikro gramm (10^{-6} g)

9. Anhang

Anhang A

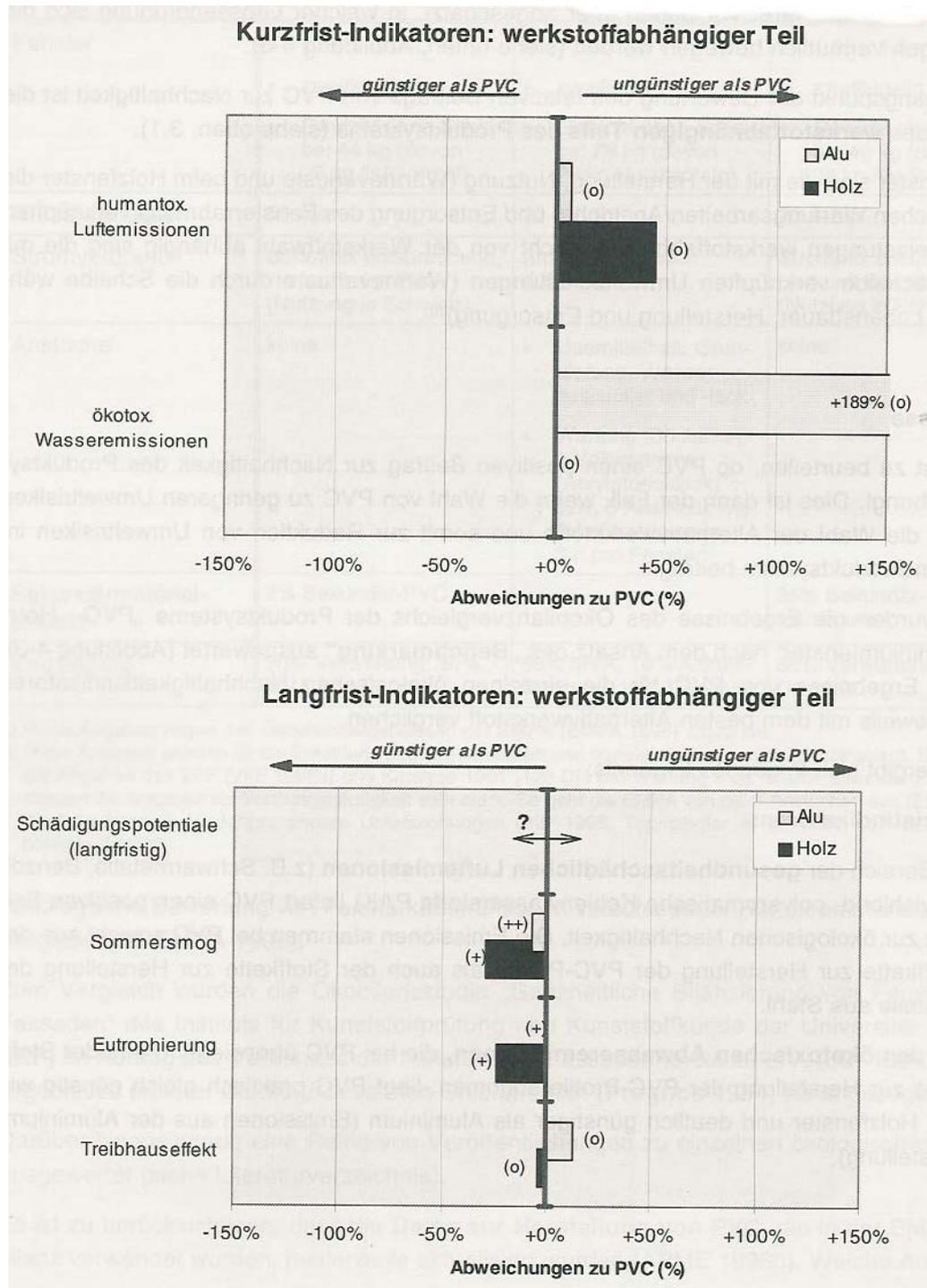
Fließbild der Recycling Anlage für PVC-Bodenbeläge in Troisdorf



aus: <http://www.agpr.de/seiten/fliess.htm>

Anhang B

Vergleich der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatoren von Fenstern
(Abweichung zu PVC; Quelle: EMPA 1996)

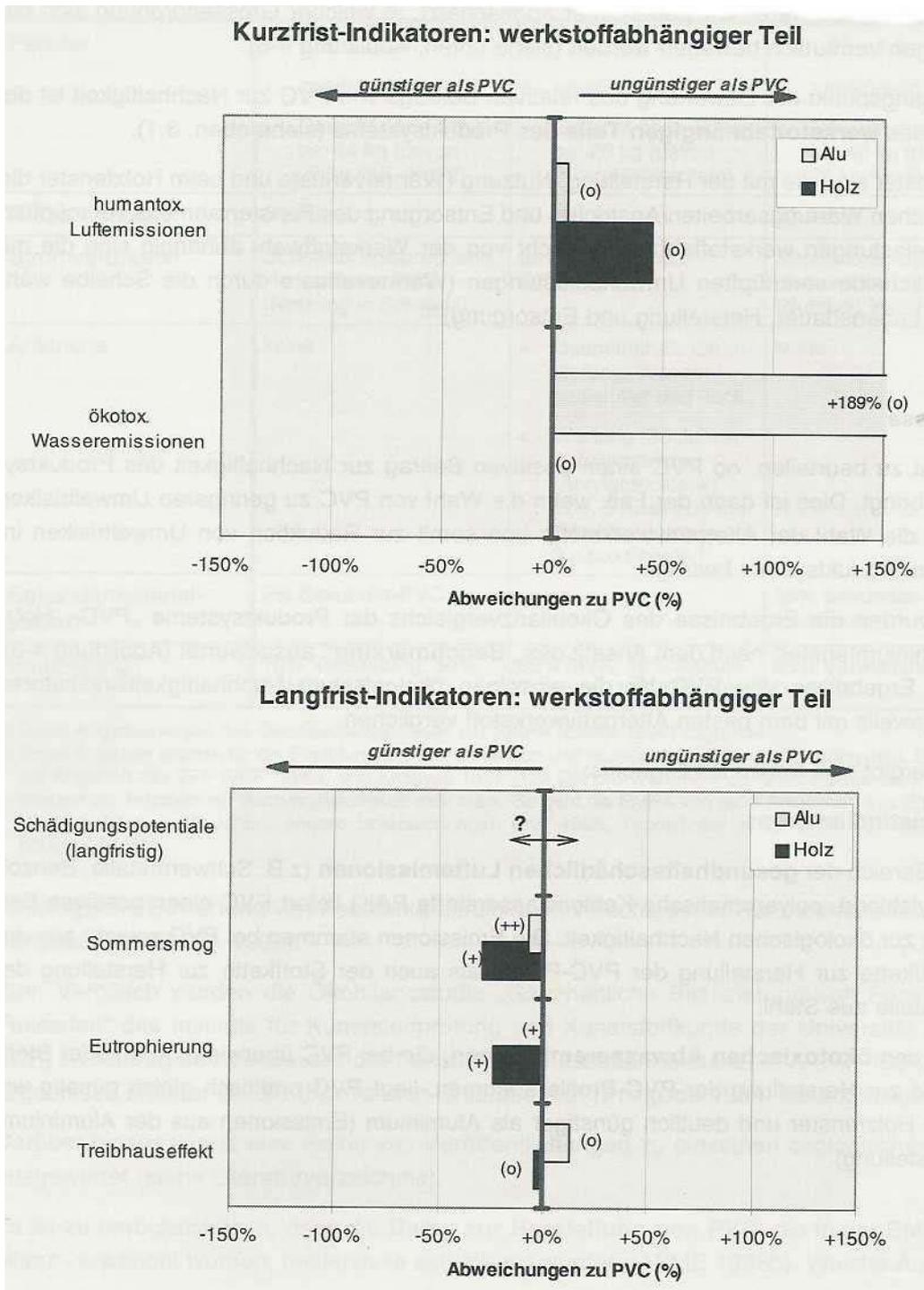


Angaben in Klammern: Qualitative Abschätzung der Veränderung der Position von PVC aufgrund der aktualisierten Daten zur PVC-Herstellung (APME 1998)

aus: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“

Anhang C

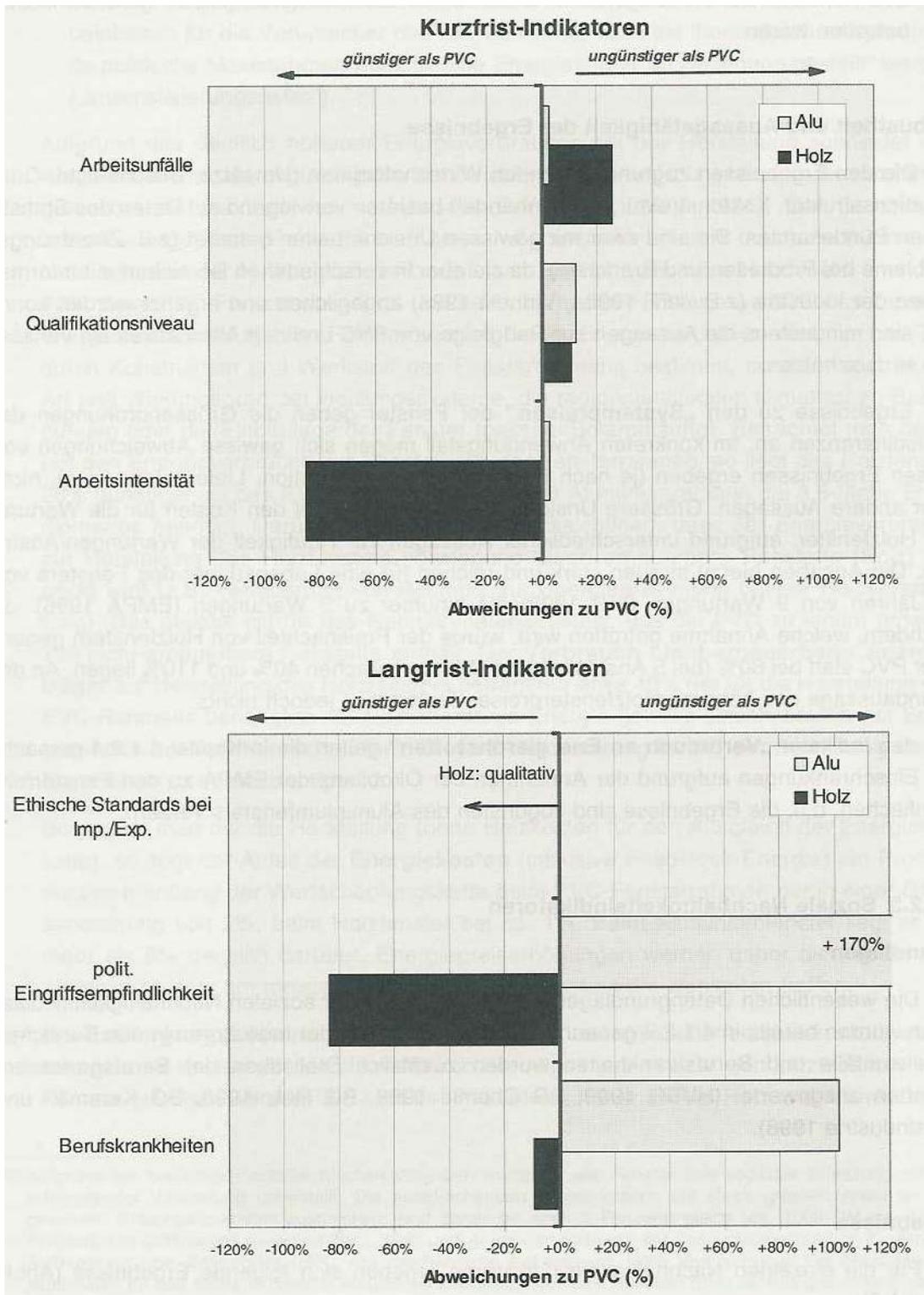
Vergleich der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatoren für Fenster (Abweichungen zu PVC)



aus: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“

Anhang D

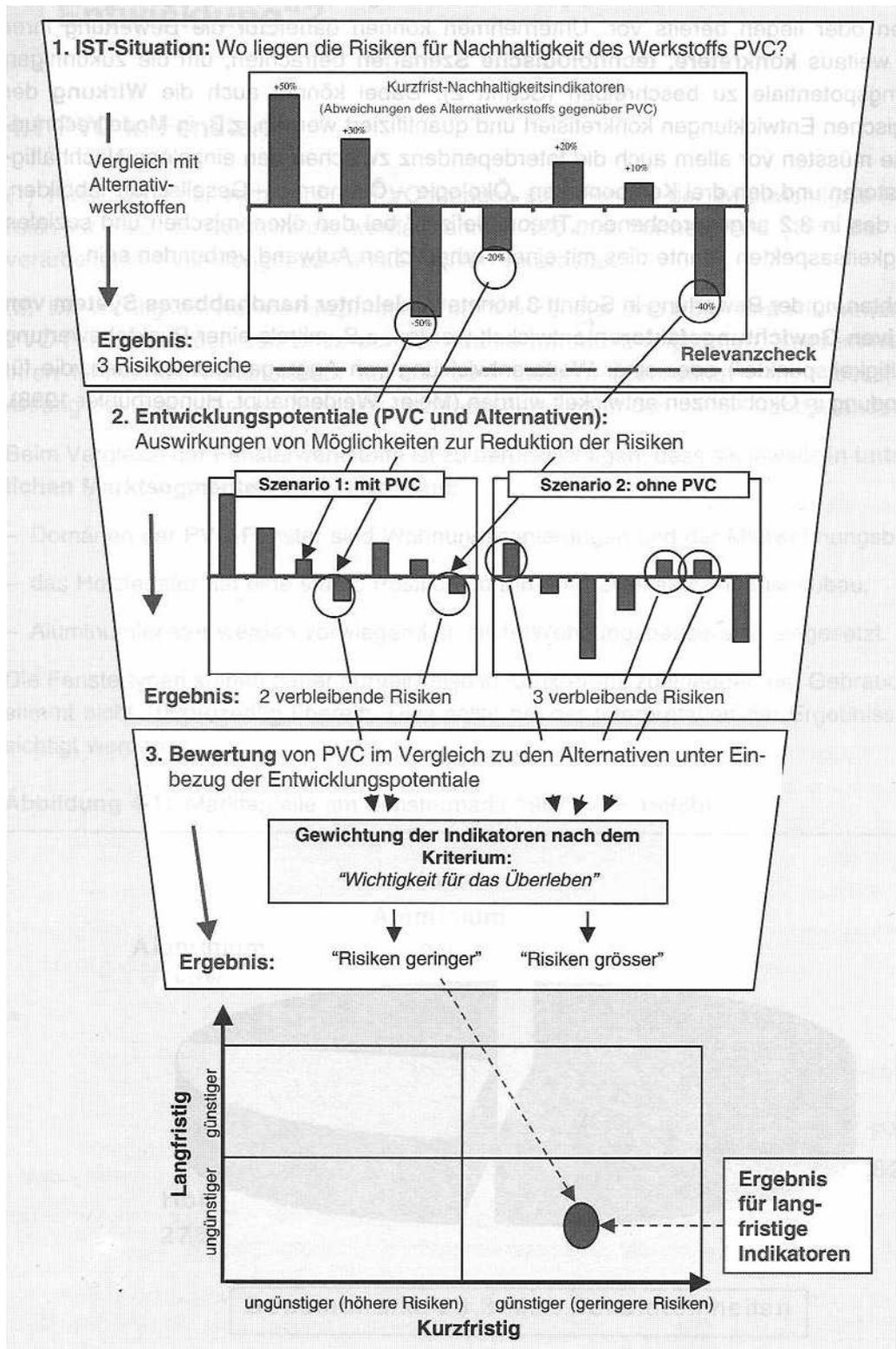
Vergleich der sozialen Nachhaltigkeitsindikatoren für Fenster (Abweichungen zu PVC)



aus: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“

Anhang E

Ablauf der Bewertung anhand eines fiktiven Beispiels



aus: AgPU (Hrsg.): „PVC und Nachhaltigkeit“

9. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt allen, die mich während des gesamten Studium unterstützt und mir auch bei Problemen geholfen haben. Insbesondere möchte ich meinen Eltern danken, die mich finanziell unterstützt und mir dadurch den Rücken freigehalten und mir auch immer wieder Hilfestellungen gegeben haben. Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundin Melanie, die mir bei der Entscheidung für dieses Examensthema sehr geholfen hat und die mir immer eine Hilfe war.

Mein Dank gilt selbstverständlich auch allen Korrekturlesern und allen Firmen und Verbänden, die mir ausreichend Literatur zur Verfügung gestellt haben, sodass ich ein großes Spektrum an Meinungen und Ansichten erhalten habe.

Herrn Prof. Klemmer möchte ich ganz herzlich für seine Unterstützung und Anregungen danken, die mir für meine Examensarbeit sehr geholfen haben. Diese Arbeit hat mir die Chance gegeben, einen vielschichtigen Sachverhalt umfangreich und kritisch zu bearbeiten und somit einen Blick für „das Ganze“ zu bekommen.