

Technologiestudie zur Verarbeitung von Polyvinylchlorid (PVC)

Ansilla Franck
Marc Knoblauch
Benjamin Sandoz

Angefertigt für
PlasticsEurope Deutschland e.V.
Karlstr. 21
60329 Frankfurt

in Kooperation mit
AGPU
Am Hofgarten1-2
53113 Bonn

durch das
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal (Berghausen)

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Additivierung und Compoundierung	3
2.1 Lichtschutzmittel	3
2.2 Stabilisatoren	3
2.3 Costabilisatoren	4
2.4 Säurefänger	4
2.5 Weichmacher	4
2.6 Gleitmittel	4
2.7 Hochpolymere Verarbeitungshilfsmittel	5
2.8 Hochpolymere Additive zur Verbesserung der Schlagzähigkeit	5
2.9 Füllstoffe und Verstärkungsmittel	5
2.10 Farbmittel	6
2.11 Brandschutzausrüstung für Thermoplaste	6
2.12 Antistatika	6
2.13 Chemische Treibmittel	6
2.14 Herstellung von Gemischen, Agglomeraten und Granulaten	7
2.15 Herstellung von PVC-Pasten	7
3 Verarbeitung	9
3.1 Extrusion	10
3.2 Spritzguss	14
3.3 Kalandrieren	17
3.4 Blasformen	21
3.5 Pastenverarbeitung	25
3.5.1 Streichverarbeitung	25
3.5.2 Gießen	25
3.5.3 Sprühauftrag	28
3.5.4 Tauchverfahren	28
3.6 Schmelzwalzenverfahren	29
4 Weiterverarbeitung von PVC-Halbzeugen	31
4.1 Verstrecken	31
4.2 Biegen	31
4.3 Thermoformen	31
4.4 Spangebendes Formen	32
4.5 Verbindungen	33
4.5.1 Schweißen	33
4.5.2 Kleben	36
4.5.3 Schrauben und Schraubverbindungen	36
4.5.4 Nieten	36
4.5.5 Umbördeln	37
4.5.6 Weitere mechanische Fügeverfahren	37
4.5.7 Konstruktive Verbindungen	37
4.6 Metallisieren	38
4.7 Lackieren	38
4.8 Bedrucken	38
4.9 Prägen	39
5 Zusammenfassung	40
Literaturverzeichnis	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verarbeitungsbedingungen für PVC [3].....	9
Tabelle 2: Schweißverfahren für PVC [6].....	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip einer Flachfolien-Extrusionsanlage [6]	12
Abbildung 2: Beispiel einer 3-teiligen Coextrusionsanlage [8]	13
Abbildung 3: Zyklusablauf beim Spritzgießen [6].....	14
Abbildung 4: Kalanderbauformen [6]	17
Abbildung 5: Streckblasprozess [6]	23
Abbildung 6: Prinzip der Verarbeitung durch Rotationsformen [9]	26
Abbildung 7: Werkzeug zur Herstellung des Ballrohlings [9].....	27
Abbildung 8: Werkzeug zur Herstellung Puppenkopfes (links) und –armes [9].....	28
Abbildung 9: Beschickung und Filmbildung beim Schmelzwalzenverfahren [6].....	29

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-P	Polyvinylchlorid mit Weichmacher
PVC-U	Polyvinylchlorid ohne Weichmacher
E-PVC	PVC aus der Emulsionspolymerisation
S-PVC	PVC aus der Suspensionspolymerisation
M-PVC	PVC aus der Massepolymerisation
C-PE	Chloriertes Polyethylen

1 Einleitung

Polyvinylchlorid (PVC) steht beim globalen Verbrauch von Kunststoffen hinter PE und PP an dritter Stelle [3]. PVC ist einer der vielseitigsten Kunststoffe und findet insbesondere in den Bereichen Bau, Medizin, im Designbereich oder in der Automobilindustrie Verwendung.

Trotz immer stärker werdender Konkurrenz durch andere Werkstoffe entfallen etwa 20% der weltweiten Kunststoffproduktion auf PVC. Da sich PVC mit den wachsenden Anforderungen ständig weiterentwickelt hat – ökonomisch, technologisch und ökologisch- und auch weiterhin entsprechende Potentiale besitzt, wächst seine Verwendung voraussichtlich auch in Zukunft noch. An der Spitze stehen dabei die rasch emporstrebenden Staaten des Fernen Ostens mit zweistelligen Zuwachsraten.

PVC ist heute einer der am besten untersuchten Werkstoffe. Die mit seiner Herstellung, Verwendung und Entsorgung zusammenhängenden Risiken sind weitgehend bekannt und wurden und werden weiterhin minimiert.

Der Ausgangsstoff des PVC, das Vinylchlorid, wird überwiegend aus Chlor und Ethylen hergestellt. Die Polymerisation (Additionsreaktion) geschieht radikalisch und der Polymerisationsgrad bzw. die molare Masse wird mit Hilfe der Reaktionstemperatur gesteuert. PVC wird aus den Rohstoffen Erdöl (43%) und Steinsalz (57%) hergestellt. Großtechnisch wird PVC mit drei verschiedenen Polymerisationsverfahren hergestellt:

- Emulsionspolymerisation (E-PVC) u. a. für kleine verpastbare Korngrößen (Sekundärteilchen von ca. 10 µm, die ihrerseits aus Primärteilchen von 0,2 – 2µm bestehen).
- Suspensionspolymerisation (S-PVC): 90 % der globalen PVC-Menge wird mit diesem Verfahren hergestellt [1].
- Massepolymerisation (M-PVC): dieses PVC ist bei sehr hohen Anforderungen an die Transparenz (dicke glasklare Platten) oder im Bereich der Sterilisationsfolien dem S-PVC vorzuziehen, verliert aber in den letzten Jahren an Bedeutung [1].

Diese üblichen Herstellungsverfahren für PVC beeinflussen vor allem das äußere Erscheinungsbild wie z. B. Korngröße, Kornform oder auch die Kornporosität, welche entscheidend für die Weichmacheraufnahme ist. Nachhaltiger wirkt sich die chemische Natur bestimmter Zusatzstoffe wie Stabilisatoren, Gleitmittel, Füllstoffe, Pigmente, Treibmittel, Antistatika, Flammschutzadditive, UV-Stabilisatoren, Fungizide u. a. auf die Eigenschaften des Endproduktes aus.

PVC verfügt unter den Thermoplasten über das breiteste Verarbeitungs- und Anwendungsspektrum. Dies ist vor allem darauf zurück zu führen, dass eine Vielzahl von Funktionszusatzstoffen entwickelt wurden, die es ermöglichen verarbeitungs- und anwendungstechnisch sehr leistungsfähige Compounds herzustellen.

Die große Bandbreite von Eigenschaften eröffnet umfangreiche Innovationsmöglichkeiten und eine Vielfalt von Anwendungen für Produkte aus dem Werkstoff PVC: von robusten Wasserrohren bis zu leichten Dachmembranen.

Aufgrund der öffentlichen Kritik am Werkstoff PVC hat sich auch die deutsche Politik in Gremien, Konferenzen und Kommissionen mit dem Werkstoff PVC beschäftigt. Signifikante, unverantwortbare Schwachstellen am Werkstoff PVC wurden von diesen Organen nicht festgestellt [12].

Auch auf europäischer Ebene hat sich die Politik mit dem Werkstoff PVC befasst. Anfang 1999 wurden fünf Studien an verschiedene Auftragnehmer zu den unterschiedlichen Aspekten der

Entsorgung von PVC vergeben. Auf Basis dieser Studien hatte die EU-Kommission dann im Juli 2000 ein Grünbuch zu PVC vorgelegt und alle interessierten Kreise aufgefordert, hierüber zu diskutieren. Es sind mehrere tausend Stellungnahmen, laut EU-Kommission, zum PVC-Grünbuch eingegangen, davon äußerten sich über 98 % positiv zum Einsatz und zur Verwendung von PVC [14].

Ende 2000 fand eine öffentliche Anhörung statt, im April 2001 stimmte das Europäische Parlament über den Grünbuch-Bericht des Abgeordneten Sacconi und zahlreiche Änderungsanträge ab. Anträge zum Verzicht auf PVC generell oder auf Weich-PVC sowie die Forderung, PVC-Produkte als nicht nachhaltig zu bewerten, wurden abgelehnt. Insgesamt forderte das EU-Parlament, das Recycling zu verstärken. Das EU-Parlament hat erkannt, dass sich das Grünbuch der Kommission hauptsächlich auf die Analyse der Umweltauswirkungen von PVC auf die Abfallwirtschaft konzentriert, ohne sämtliche Aspekte von PVC-Erzeugnissen während des gesamten Lebenszyklus zu analysieren und ohne die wirtschaftlichen Vor- und Nachteile dieses Materials umfassend zu untersuchen.

Die EU-Kommission plant als Schlussfolgerung aus der Grünbuchdebatte eine „Mitteilung“ [13].

Um eine nachhaltigen Entwicklung voranzutreiben und zu koordinieren, hat die europäische PVC-Branche - vertreten durch alle Haupt-Verbände ECVM (PVC-Hersteller), ECPI (PVC-Weichmacher-Hersteller), ESPA (PVC-Stabilisatoren-Hersteller) und EuPC (Kunststoff-Verarbeiter), im März 2000 eine freiwillige Vereinbarung, die „Selbstverpflichtung der PVC-Branche zur nachhaltigen Entwicklung“ verabschiedet. Die Selbstverpflichtung ist ein 10-Jahres-Programm zum Nachhaltigen Wirtschaften und zur laufenden ökologischen Verbesserung der gesamten PVC-Branche. Die Verpflichtung deckt jedes Stadium des Lebensweges eines PVC-Produktes von der Herstellung, der Ressourcen-Effizienz bis hin zur Verwertung und Entsorgung ab. Essentielle Elemente sind quantifizierbare und nachweisbare Ziele. Zum Erreichen dieser Ziele werden Termine festgelegt, um in einem stufenweisen Prozess das Gesamtziel zu erreichen. Jedes Jahr wird ein Bericht über das jeweils abgelaufene Jahr veröffentlicht, der allen Interessenten zugänglich gemacht wird [12].

PVC ist ein sehr vielseitiges Material, das in vielerlei Anwendungsbereichen eingesetzt werden kann. Je nach Eigenschaft des Materials kommen unterschiedliche Verarbeitungsverfahren zum Einsatz. Die vielfältigen Verarbeitungsmethoden werden in der vorliegenden Studie dargestellt. Die Hauptverarbeitungsverfahren werden durch die Beschreibung von Vor- und Nachbehandlungsmethoden ergänzt.

2 Additivierung und Compoundierung

PVC kann wie kein anderer Thermoplast mit Hilfe von Zusatzstoffen in seinen Eigenschaften modifiziert werden.

PVC wird – wie die meisten anderen Werkstoffe – nicht alleine verarbeitet, sondern im Gemisch mit Zusatzstoffen. Sein chemischer Aufbau – der Fachmann spricht von polarer Struktur – erlaubt es dem PVC, eine große Menge der unterschiedlichsten Komponenten aufzunehmen. Auswahl und Dosierung dieser Stoffe bestimmen wesentlich die Verarbeitungseigenschaften der PVC-Mischung und die Gebrauchseigenschaften des Fertigproduktes. Da sich diese in weiten Grenzen variieren lassen, ist die große Anwendungsbreite von PVC leicht erklärbar.

Die wichtigsten Additive für PVC sind Stoffe zur Verbesserung physikalischer Eigenschaften wie Temperatur-, Licht- und Wetterbeständigkeit, Zähigkeit, Elastizität und Transparenz. Daneben werden Stoffe zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Farbpigmente zugesetzt. All diese Stoffe sind im PVC-Fertigprodukt fest eingebunden und praktisch nicht bioverfügbar.

An die heute verwendeten PVC-Additive werden hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen in möglichst geringer Konzentration eine hohe Wirkung aufweisen, die durch die unterschiedlichen Herstellungsprozesse für das Kunststoff-Formteil nicht beeinträchtigt werden darf. Sie müssen dem Formteil während dessen Gebrauchsdauer die gewünschten Eigenschaften verleihen und auch aus Konsumentensicht sicher anwendbar sein [13].

Im folgenden Kapitel sind die wichtigsten Additive für PVC kurz erläutert.

2.1 Lichtschutzmittel

PVC kann durch Licht, Luft und andere Witterungseinflüsse geschädigt werden. Typische Schadensbilder sind Verfärbungen, Belagsbildung, Versprödung und Rissbildung an der Oberfläche. Hauptursache ist der Einfluss von UV-Strahlung. Da PVC in dem betroffenen Bereich selbst keinerlei Licht absorbiert, müssen Verunreinigungen, Abbauprodukte der thermischen Zersetzung (Carbonylgruppen, Polysequenzen) und sauerstoffhaltige Verbindungen aus der Herstellung dafür verantwortlich sein. Als Lichtschutzmittel werden UV-Absorber (Stoffe, die Hydroperoxide abbauen können und/oder elektronisch angeregte Zustände deaktivieren und/oder Radikale binden) eingesetzt [2].

2.2 Stabilisatoren

PVC muss vor allem bei der Verarbeitung, aber auch bei der Nutzung gegen thermolytischen Abbau, der sich bei ca. 100°C bereits deutlich bemerkbar macht, geschützt werden.

Die Abbaureaktionen können durch Additive verzögert oder gestoppt werden. Dabei ist eine Kombination von Thermo- und Lichtstabilisatoren in einem Stoff möglich. Erst diese Additive machen den breiten Einsatz von PVC möglich. Allerdings nehmen sie deutlichen Einfluss auf die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften des PVC [2]. Deshalb ist es wichtig, das Stabilisator-System auf die jeweilige Verarbeitung und Anwendung anzupassen.

Für die Stabilisierung von PVC-Mischungen stehen Organozinn-Stabilisatoren, Blei-Barium-Zink und Calcium-Zink-Stabilisatoren sowie Calcium-organische und andere metallfreie Stabilisatoren zur Verfügung.

Cadmium-basierte Stabilisatoren sind aufgrund einer freiwilligen Selbstverpflichtung der PVC-verarbeitenden Industrie in Europa seit 2001 nicht mehr im Einsatz. Blei-basierte Stabilisatoren sollen bis spätestens 2015 sukzessive durch schwermetallfreie Alternativen ersetzt werden.

Eine nicht ausreichende Stabilisierung von PVC verursacht Zersetzungsprozesse unter Abspaltung von HCL. Die macht sich zum Beispiel bemerkbar beim Verarbeiten durch Kleben des Materials in der heißen Maschine, durch Blasen im Material und letztendlich auch durch Verfärben des Materials [3], [4].

2.3 Costabilisatoren

Costabilisatoren nehmen in komplexen Stabilisatorsystemen eine wichtige Rolle ein. Sie wirken meist synergetisch mit einem weiteren Stabilisator, indem sie gezielt bestimmte Abbaureaktionen unterbrechen, Defektstellen inertisieren oder auf die Zersetzung katalytisch wirkende Zwischenprodukte der Stabilisierungs- oder Abbaureaktionen auffangen.

Bei den Costabilisatoren handelt es sich meist um organische Substanzen wie Organo-Phosphite, Polyole, 1,3-Diketone, Epoxyverbindungen, Antioxidantien oder UV-Stabilisatoren [3].

2.4 Säurefänger

Bei der thermoplastischen Verarbeitung (Temperaturen von 160 bis 200 °C) möglicherweise entstehender Chlorwasserstoff wird durch den Zusatz von Säurefängern gebunden. Mineralische Stoffe wie z. B. Hydrotalcit und Hydrocalumit, Zeolithe und andere organische basische Verbindungen zählen zur Gruppe der Säurefänger [3].

2.5 Weichmacher

PVC ist einer von sehr wenigen Thermoplasten, deren Härte sich von gummiartiger Elastizität bis zu harten Mischungen einstellen lässt. Dadurch vergrößert sich der Anwendungsbereich außerordentlich. Weichmachung lässt sich über eine Copolymerisation (innere Weichmachung) oder über Additive (externe Weichmachung) steuern. Die Verwendung von äußeren Weichmachern hat die weit größere Bedeutung. Hierfür stehen zahlreiche Additive zur Verfügung. Als Weichmacher dienen vor allem Phthalsäureester. Der wichtigste Weichmacher ist das DEHP (Di-2-ethylhexyl-Phthalat). In den letzten Jahren gewinnt DINP (Di-isononylphthalat) zunehmend Marktanteile. Geringere Bedeutung haben Ester der Adipinsäure und andere organische Säuren sowie Ester der Phosphorsäure. Bei den so genannten Polymerweichmachern handelt es sich vor allem um Polyester der Adipinsäure. Wirtschaftlich am Bedeutendsten sind die Phthalatweichmacher. Bedeutender als die Art des eingesetzten Weichmachers ist jedoch die Menge, die theoretisch keine stöchiometrisch bedingte Obergrenze kennt [2]. Je nach Art des Weichmachers kann es bei niedrigen Anteilen zur Versprödung kommen, so dass mindestens ein Zusatz von 20% erforderlich ist [4]. Mit einem geringen Weichmacheranteil sind die Produkte halbhart, bei höheren Anteilen werden sie zunehmend weicher und flexibler [3].

Weichmacher können durch Verdampfen, Migration oder Extraktion auch wieder aus dem PVC allmählich entweichen. Normalerweise ist dies jedoch nicht erwünscht [2].

2.6 Gleitmittel

Gleitmittel wirken den Reibungskräften beim Mischen, Plastifizieren und Verformen entgegen und vereinfachen so die Verarbeitung von PVC. Das Material kann durch den Einsatz von Gleitmitteln bereits bei niedrigeren Temperaturen verformt werden und wird somit geschont. Außerdem wird die Anhaftung des PVC an den Werkzeugen verringert. Bei den Gleitmitteln wird zwischen internen und externen Gleitmitteln unterschieden. Interne Gleitmittel dringen in die PVC-Körner ein und reduzieren die Erweichungstemperatur. Es handelt sich hier um chemisch vorwiegend niedermolekulare, gut PVC-verträgliche Kohlenwasserstoffe mit polaren Gruppen. Externe Gleitmittel, die nicht in die PVC-Körner eindringen können, erniedrigen die Reibung zwischen den PVC-Körnern und an der Grenzfläche der Maschinenwand zu PVC-Schmelze [3]. Alle Gleitmittel sind Kohlenwasserstoffketten und haben eine Kettenlänge von mindestens 12 C-Atomen [4]. Bei den externen Gleitmitteln handelt es sich weitgehend um

hochmolekulare unpolare Stoffe, wie z.B. Polyethylenwachse oder Paraffinwachse. Für die Löslichkeit der Gleitmittel im PVC ist neben der Polarität auch das Verhältnis der polaren Gruppen zum Kohlenwasserstoffrest entscheidend [3]. Da die eingesetzten Gleitmittel auch die Eigenschaften des Endprodukts beeinflussen, muss bei der Auswahl auch darauf Rücksicht genommen werden [2].

2.7 Hochpolymere Verarbeitungshilfsmittel

Diese Additive beeinflussen die Schmelzelastizität, das rheologische Verhalten und beschleunigen den Schmelzvorgang, ohne jedoch die Eigenschaften des Endprodukts in erheblichem Maß zu verändern. Sie werden in jedem Einsatzbereich von PVC-U (PVC-hart) eingesetzt und eignen sich zum Extrudieren, Blasformen, Kalandrieren und Spritzgießen.

Dabei existieren universelle Verarbeitungshilfen genauso wie auf einen Zweck optimierte.

Die Produktion mit PVC-U wird so deutlich kostengünstiger, die Oberflächenqualität steigt und die Additive sind für den Einsatz von Lebensmittelverpackungen geeignet [2].

2.8 Hochpolymere Additive zur Verbesserung der Schlagzähigkeit

PVC hat vor allem bei niedrigen Temperaturen eine sehr niedrige Schlag- und Kerbschlagzähigkeit [2]. Dies ist für viele Praxisanwendungen von Nachteil. Diese Schwachstelle kann durch Modifizierungen mit sogenannten Impact-Modifiern behoben werden. Diese Modifier haben die Aufgabe, durch Ausbildung einer Polymer-Modifier-Matrix gegebenenfalls auftretende Schlagenergiebelastungen gleichmäßig im Formteil zu verteilen und zu dämpfen. Eingesetzt werden Polybutylacrylate, chloriertes Polyethylen (C-PE) und andere. Dabei haben Acrylsäureester heute die weitaus größte Bedeutung als Schlagzähmodifizierer für PVC. Diese Ester können dem PVC im Anteil von 6 bis 7 % zugemischt und so zu Polymerblends verarbeitet werden (mit 4-6% spricht man von Schlagzähmodifizierung, mit größeren Mengen von innerer Weichmachung (50%)). Die Schlagzähmodifizierung kann auch durch Pfropfung von PVC mit Acrylsäureester direkt bei der Polymerisation des Vinylchlorids zum Polyvinylchlorid vorgenommen werden. Diese Produkte werden als Pfropf-Copolymerisate bezeichnet. Chloriertes Polyethylen (C-PE) wird heute nur als Impact-Modifier zur Herstellung von Polyblends angeboten. C-PE kann alleine als Impact-Komponente oder auch in Kombination mit Acrylaten als sogenannte Mischmodifizierung eingesetzt werden [4].

2.9 Füllstoffe und Verstärkungsmittel

PVC lässt sich mit Füllstoffen versehen, die als Hauptzweck das Mischungsvolumen erhöhen sollen. Unter einem Füllstoff versteht man vorzugsweise zerkleinerte, feste, meist anorganische Stoffe unterschiedlicher Korngröße und Teilchenform [2]. Mit einer gezielten Auswahl und chemischen Vorbehandlung der in der Regel eingesetzten Mineralien ist es auch immer häufiger möglich, bestimmte Eigenschaften der Formstoffe sowie ihre Verarbeitung zu verbessern. Bei PVC-U werden vor allem Rohr- und Profil- Werkstoffe mit Calciumcarbonat gefüllt. Abwasserrohre enthalten beispielsweise 10-30 Teile und Drainagerohre 5 bis 20 Teile Füllstoff bei einer Wanddicke von oft weniger als 0,8 mm. Bei Fensterprofilen werden 5 bis 10 Teile zugegeben. Bei Profilen, wie Sockelleisten und Rollläden liegt der Gehalt bei 25 bis 30 Teilen.

Calciumcarbonat ist mit seinen drei Erscheinungsformen Kreide, Kalkstein und Marmor der wichtigste Füllstoff für PVC-P (PVC-weich). Beim PVC-P enthalten vor allem Kabel- und Profilmischungen höhere Anteile von Calciumcarbonat. Bei Primärisolationen sind es 50 bis 70 Teile, bei Mantelmischungen 80 bis 100 Teile und bei ausfüllenden Strängen in Kabeln bis zu 350 Teile. PVC-P-Profile wie Sockelleisten und Keder enthalten bis zu 150 Teile, spritzgegossene Erzeugnisse 10 bis 15 Teile. Durch Verwenden von feinteiliger, oberflächenbeschichteter Kreide kann der Plate-out Effekt beim Kalandrieren und bei der Extrusion verhindert werden. Kaolin wird vor allem in der Kabelindustrie eingesetzt, denn es erhöht den spezifischen

Durchgangswiderstand der Kabelmassen. Silikate verringern Plate-out und das Blocking, sie dienen der Kabelindustrie als Ionenfänger.

Für PVC-Plastisole werden natürliche Calciumcarbonate als Extender-Füllstoffe für Streich- und Tauchpasten sowie Schaumstoffe aus PVC-Pastenware verwendet.

Bei PVC werden nur selten Verstärkungsstoffe eingesetzt [3]. Eingesetzt wird Holzmehl in der Extrusion z.B. für Bauprodukte oder Glasfaser beim Spritzguss oder Extrudieren für Halbzeuge [2]. Auch der Einsatz von Naturfasern als Verstärkungsmittel wird derzeit erprobt. Glasfasern dienen mitunter zum Verstärken spritzgegossener Formteile und extrudierter Halbzeuge wie Tafeln und Profile, die sogar kalt umformbar sind [3].

2.10 Farbmittel

Pigmente und Farbstoffe sind in den verschiedensten Farbtönen und für jedes Einsatzgebiet verfügbar [2].

2.11 Brandschutzausrüstung für Thermoplaste

PVC selbst hat durch seinen Chlorgehalt von ca. 57 % einen effektiven inhärenten Flammschutz. Dieser kann durch den Zusatz von Additiven teilweise herabgesetzt sein. Falls für das Produkt ein Flammschutz notwendig ist, muss abhängig von den Anforderungen und der Qualität des modifizierten PVC, dieses zusätzlich mit einem Flammschutz ausgerüstet werden. Dadurch werden allerdings die Eigenschaften des Polymers beeinflusst. In PVC werden Flammschutzmittel und Rauchminderer eingesetzt. Am häufigsten wird Antimontrioxid verwendet, das mit dem Chlor aus dem Polymer Antimonhalogenide bildet, die flammhemmend wirken [2].

2.12 Antistatika

Um eine elektrostatische Aufladung von Kunststoff zu verhindern, kann dessen Leitfähigkeit erhöht werden. Dies kann durch den Einsatz von externen oder internen Antistatika oder leitfähigen Füllstoffen wie beispielsweise Ruß geschehen. Für PVC-P und PVC-U müssen unterschiedliche Additive eingesetzt werden. Für PVC-P werden ethoxylierte Alkohole und Fettsäureester eingesetzt, bei PVC-U werden häufig Ammoniumsalze, Fettsäureester und Alkylsulfonate als Antistatika verwendet [5].

2.13 Chemische Treibmittel

Bestimmte PVC-Arten lassen sich mit Hilfe von Treibmitteln zu Formteilen verschäumen. Mit diesem Verfahren können Polymere mit niedrigem K-Wert (ca. 58-60, bei Pastenverarbeitung ca. 65-75) verarbeitet werden. Neben den Treibmitteln kommen Verschäumungshilfsmittel auf PMMA-Basis zum Einsatz. Für PVC können die folgenden Treibmittel zum Schäumen eingesetzt werden:

- Azodicarbonamid (ADC) ist das wichtigste Treibmittel zum Verschäumen von PVC. Da der Zersetzungspunkt des reinen Produktes mit ca. 210°C über den üblichen Verarbeitungstemperaturen von PVC liegt, werden Substanzen zugesetzt, die den Zersetzungspunkt auf 150 bis 190°C herabsetzen. Je Gramm Azodicarbonamid werden bei vollständiger Zersetzung ca. 220 ml Gas frei.
- 4,4-Oxibis (Benzolsulfohydrazid, OBSH) spaltet ca. 25 ml Gas/g Substanz ab.
- Natriumhydrogencarbonat ist das preisgünstigste Treibmittel für PVC. Treibmittelzubereitungen mit einem hohen Anteil an Natriumhydrogencarbonat werden vor allem für Anwendungen eingesetzt, bei denen neben der gewünschten Schaumbildung noch eine relativ harte Außenschicht erreicht werden soll, z.B. für Integralschaumplatten oder geschäumte Siding-Profile [4].

2.14 Herstellung von Gemischen, Agglomeraten und Granulaten

PVC und seine Copolymerisate sind so, wie sie nach den Herstellungsverfahren von Suspensions-, Emulsions- und Massepolymerisation anfallen, noch nicht direkt verarbeitbar, d. h. sie müssen durch Beimischung verschiedener Additive und Zuschlagstoffe verarbeitungsfähig gemacht werden. Sämtliche Zusatzstoffe müssen vor der Verarbeitung durch Aufbereitung (Mischen, Agglomerieren, Granulieren oder Verpasten) im PVC homogen verteilt und eingearbeitet werden. Die Additive können in das Monomere bzw. unmittelbar in Verbindung mit der Polymerisation eingebracht werden. Diese Verfahren werden hauptsächlich bei Rohstoffherstellern für große Chargen mit gleichem Eigenschaftsprofil durchgeführt. Bei der PVC-Aufbereitung werden die Additive unabhängig von der PVC-Herstellung in einer gesonderten Fertigungsstufe eingearbeitet. Dieses Verfahren wird in verschiedenen Modifikationen bei den Rohstoffherstellern, aber auch bei Compoundeuren und Verarbeitern eingesetzt. Je nach Verfahren erhält man eine Pulver- oder Körnermischung, eine Paste, ein Agglomerat oder ein Granulat. Bei einem weiteren Verfahren werden die Additive unmittelbar vor bzw. während der Verarbeitung von PVC zu Halbzeugen und Fertigteilen eingearbeitet. So werden beispielsweise Farbkonzentrate als Masterbatches eingearbeitet. Das Herstellen von PVC-Granulaten setzt sich aus folgenden Verfahrensschritten zusammen:

- Silieren der Einsatzstoffe
- Dosieren der Einsatzstoffe:
Hier werden kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren sowie gravimetrische und volumetrische Verfahren unterschieden und eingesetzt.
- Mischen, Entgasen und gegebenenfalls Zwischenkühlen:
Beim Mischen wird zwischen mechanischem und pneumatischem Mischen unterschieden, es wird jedoch hauptsächlich das mechanische Mischen bei der PVC-Aufbereitung eingesetzt.
- Einspeisen, Homogenisieren, Entgasen, Plastifizieren, Verformen (Extrudieren)
- Zerkleinern
- Kühlen und gegebenenfalls Entgasen
- Lagern

zusammen. Entfallen die Vorgänge Extrudieren und Zerkleinern, handelt es sich um eine Anlage zum Herstellen von PVC-Pulvergemischen (Dryblend). Je nach Auslegung der Vorgänge Mischen, Entgasen und Zwischenkühlen sind auch PVC-Agglomerate oder PVC-Pasten herstellbar. Bei der Herstellung von Agglomeraten werden die Einsatzstoffe mit Hilfe von schnell laufenden Rotoren vermischt und gleichzeitig erwärmt, bis Agglomerate der gewünschten Spezifikation entstehen. Um ein weiteres, ungewünschtes Zusammenballen zu vermeiden, werden die Agglomerate einem Kühlmischer zugeführt. Teilweise sind den Kühlern Mühlen zum Zerkleinern des Siebgutes oder Siebe zum Ausscheiden des Grobgutes vorgeschaltet [6].

2.15 Herstellung von PVC-Pasten

Im Gegensatz zu anderen Thermoplasten kann PVC mit Weichmachern bei Raumtemperatur in einen flüssig-pastösen Zustand überführt werden. Neben den Weichmachern können die Pasten auch andere Additive enthalten. Die PVC-Pasten können mit einfachen Verfahren wie Tauchen, Beschichten, Gießen und Streichen verarbeitet werden. Die Aushärtung der verarbeiteten Pasten erfolgt bei Temperaturen von 160 bis 220 °C [6].

Zur Herstellung von PVC-Pasten können die im Emulsions- und Mikrosuspensionsverfahren hergestellten Pulver verwendet werden. Wichtig ist, dass die Pulver ein ausreichend feines Korn besitzen. Die Pulver besitzen die Eigenschaft, in Weichmachern zumindest teilweise in Primärteilchen zu zerfallen und dabei ein Teilchenetzwerk zu bilden. Die Pulver werden in den Weichmachern zu Plastisolen oder PVC-Pasten dispergiert, da die Weichmacher das PVC bei Raumtemperatur nicht lösen können. Bei erhöhten Temperaturen geliert das Plastisol zu

homogenen, festen, mehr oder weniger elastischen Produkten infolge des Auflörens der PVC-Partikel.

Die Pastenherstellung setzt sich aus den folgenden Verfahrensschritten zusammen:

- Mischen
- Homogenisieren
- Entlüften
- Sieben
- Lagern
- Abfüllung und Transport.

Beim Anpasten werden PVC und Weichmacher in einem Mischer vermischt. Es wird zwischen langsam und schnell laufenden Mixchern unterschieden. Um eine gute Verpastung des PVC zu erreichen, ist es erforderlich, dass die Oberflächen aller Teilchen mit Weichmacher umhüllt werden. Dies kann durch zwei verschiedene Methoden erreicht werden: Bei der ersten Methode werden die Teilchen durch die Erzeugung einer dynamischen Scherung zwischen den einzelnen Teilchen mittels Partikel-Partikel-Kontakt getrennt. Diese Methode wird am besten dann angewendet, wenn Pasten mit hohem PVC-Anteil aufzuarbeiten sind und verwendet hauptsächlich langsam laufende Zwangsmischer mit Knetwirkung. Bei der zweiten Mischmethode wird die externe Scherung mit benutzt, das heißt die Trennung der Partikel erfolgt durch direkten Kontakt der Partikeloberflächen mit einem Rührer. Dazu muss der Rührer die Partikel mit ausreichend hoher Energie auseinander reißen. Für diesen Mischvorgang werden schnell laufende Rührer mit großen Rührerflächen und einer intensiven Umwälzung des Mischgutes verwendet.

Beim Arbeiten mit schnell und langsam laufenden Mixchern werden zunächst Weichmacher bzw. nur ein Teil des Weichmachers sowie zusätzlich flüssige Additive vorgelegt und dann das PVC-Pulver mit weiteren pulverförmigen Additiven unter Rühren hineindosiert. Die nach dem Mischen erhaltenen Rohpasten müssen in vielen Fällen von nicht aufgeschlossenen Agglomeraten, Schmutzpartikeln und Luft einschüssen befreit werden. Ob und wie weit dies erforderlich ist, hängt vom Einsatzgebiet und der Art der Aufbereitung ab. Für die Pastenhomogenisierung werden bevorzugt Walzenmühlen eingesetzt. Ein Sieb- oder Filterprozess dient der Abtrennung von größeren Partikeln. Die einfachste Methode der Pastensiebung besteht darin, die Paste durch ein Sieb laufen zu lassen. Verwendet werden Siebgewebe aus rostfreiem Stahl, auch Kunststoffsiebe sind unter bestimmten Bedingungen einsetzbar. Es besteht daneben die Möglichkeit, Pasten während des Siebens gleichzeitig zu entlüften. Dies kann in einem Vakuum-Filter geschehen. Mit Druckfiltern kann die Filterleistung gegenüber Vakuumanlagen deutlich gesteigert werden. Um Fehler bei der Weiterverarbeitung der Pasten zu vermeiden, empfiehlt es sich, diese zu entlüften. Bei der Lagerung der Pasten ist zu beachten, dass deren Viskosität mit zunehmender Lagerzeit ansteigt [6].

3 Verarbeitung

Durch unterschiedliche Additivierung lässt sich PVC mit einer Vielzahl von Verfahren verarbeiten. In der Tabelle 1 ist ein Überblick der Verarbeitungsbedingungen für die gängigsten Verarbeitungsverfahren dargestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden die Verarbeitungsverfahren für PVC näher erläutert und beschrieben.

Tabelle 1: Verarbeitungsbedingungen für PVC [3].

Verarbeitungsart	Produkte	Massetemperatur in °C				Werkzeugtemperatur in °C				Spritzdruck p_{sp} in bar			
		PVC-U		PVC-P		PVC-U		PVC-P		PVC-U		PVC-P	
		Granulat	Pulver	Granulat	Pulver	Granulat	Pulver	Granulat	Pulver	Granulat	Pulver	Granulat	Pulver
Spritzgießen		180-210	170-200	170-200	165-195	> 30	50	>15	50	1000 bis 800		400 bis 1200	
Extrudieren													
	Rohre, Schläuche	185	180	160	160	185	180	160	160	100 bis 200		75 bis 150	
	Schlauchfolien	175-205	175-195	-	-	185	185	-	-	100 bis 200		-	
	Flachfolien	-	-	160	160	-	-	160	160	160 bis 200		100 bis 200	
	Tafeln	185	180	160	160	185	180	160	160	160 bis 200		75 bis 150	
	Rohre und Profile	185	180	160	160	185	180	160	160	160 bis 200		75 bis 150	
	Drahtummantelungen	-	-	190	190	-	-	190	190	100	-	150 bis 250	
	Borsten und Monofile	185	180	-	-	185	180	-	-	100 bis 200		-	
Hohlkörperblasen		180-210	175-200	160	160	185	180	160	160	100 bis 200		75 bis 150	
Spritzblasen		185	180	-	-	-	80-160	-	-	-		1500	
Pressen		180	175	160	160	-	-	-	-	100		50	
Rotationsformen		-	-	-	-	Ca. 150				-	-	-	-
Schmelzwalzenverfahren		-	-	-	-	Ca. 250				-	-	-	-

3.1 Extrusion

Ein Großteil des PVC wird im Extrusionsverfahren verarbeitet. Die Materialvormischung (Dryblend) oder das bereits compoundingierte PVC-Granulat wird in einem speziell auf die Verarbeitung von PVC ausgerüsteten Extruder aufgeschmolzen und zum Produkt ausgeformt. Die größten Mengen an PVC werden als pulverförmige Dryblends in gegenläufigen Doppelschneckenextrudern verarbeitet [3].

Produkte der Extrusion sind zum Beispiel Rohre, Profile für die Fensterherstellung, Schläuche und Ummantelungen für Kabel.

Bei der Extrusion wird Kunststoff durch Zufuhr von mechanischer und thermischer Energie in einen plastischen Zustand gebracht. Dieser Vorgang wird in einem für den Rohstoff ausgelegten Extruder durchgeführt. Im angeflanschten Extrusionswerkzeug, auch Extrusionsdüse genannt, wird die Schmelze ausgeformt. In der nachfolgenden Kalibriervorrichtung wird das schmelzförmige Extrudat unter Einhaltung bestimmter Abmessungen geführt. Durch Kühlung wird hier gleichzeitig dem vorgeformten Profil ein Teil der zur Plastifizierung zugeführten Energie wieder entzogen. Extrusionswerkzeuge und Kalibriervorrichtung bestimmen die Abmessungen des hergestellten Halbzeuges. An die Kalibriervorrichtung schließt sich eine Kühlstrecke an. Das nachfolgende Abzugsaggregat hat die Aufgabe, den Profilstrang mit der erforderlichen Kraft und Gleichmäßigkeit durch die Kalibrier- und Kühlstrecke zu ziehen. Nach dem Abzug steht als weitere Nachfolgeeinheit der Säge Tisch, mit quer zur Extrusionsrichtung gestelltem Sägeblatt, bereit. Nachfolgend vervollständigt eine Ablagevorrichtung die Extrusionslinie [6].

Bei der Extrusion von PVC kommt es in erster Linie auf ein gutes Einzugsvermögen, eine definierte Plastifizierung, gute Entgasungsleistung und einen schonenden Aufbau des Ausformdrucks an. Hierzu werden in den meisten Fällen Doppelschneckenextruder eingesetzt. In Fällen, bei denen auf eine Entgasung verzichtet werden kann und Durchsätze $< 80 \text{ kg/h}$ gefahren werden, sind auch Einschneckenextruder eine wirtschaftliche Alternative [4]. Auch vorcompoundingierte PVC-Granulate werden häufig auf Einschneckenextrudern verarbeitet [3]. Zur Verarbeitung von PVC-U werden hauptsächlich zwei verschiedene Ausführungen von gegenläufigen, dichtkämmenden Doppelschneckenextrudern eingesetzt. Bei der ersten Ausführung handelt es sich um einen parallelen Doppelschneckenextruder, bei dem der Schneckenaußendurchmesser, der Schneckeninnendurchmesser, der Achsabstand und die Gangtiefe über die Schneckenlänge konstant sind. Die zweite Ausführung ist ein einfachkonischer oder doppelkonischer Doppelschneckenextruder. Die kammerartige Förderung bei gegenläufigen Doppelschneckenextrudern führt zu einem engen Verweilzeitspektrum, wie es für die Verarbeitung des thermisch empfindlichen PVC förderlich ist und erlaubt einen hohen Druckaufbau von mehreren 100 bar. Über den mechanischen Antrieb wird der überwiegende Teil der zur Plastifizierung erforderlichen Energie eingebracht, der Rest kommt über die Heizung der Extruderzylinder.

Einen wesentlichen Beitrag für die Produktion hochwertiger lunkerfreier Extrudate erbringt die Entgasung [4]. Bei der Schneckentemperierung wird zwischen externer und interner Temperierung unterschieden. Die interne Temperierung bietet vor allem bei hohen L/D-Verhältnissen (damit wird das Durchmesser-Längenverhältnis der Extruderschnecke bezeichnet) erhebliche Vorteile. Bei der internen Schneckentemperierung (Temperiermedium ist destilliertes Wasser) wird die Wärme, die aus dem Austragsbereich der Schnecke abgeführt wird, an das in den ersten Zonen befindliche, kältere Material wieder abgegeben. Bei der externen Schneckentemperierung wird die Wärme dagegen nach außen abgegeben und geht somit dem System verloren [7].

Nach dem Extruder können folgende Einrichtungen nachgeschaltet werden;

- Kalibriertische
- Kühleinrichtungen

- Waddickenmessenrichtungen
- Signiereinrichtungen
- Stanzeinrichtungen
- Abzugsvorrichtungen
- Abläng- und Anfasseinrichtungen
- Muffeinrichtungen [6].

Extrusion von Rohren, Profilen, Schläuchen und Ummantelungen

Für die Herstellung von Rohren werden Extruder, Extrusionswerkzeug, Kalibrierung, Kühlbad, Abzug, Säge und Abwurfeinrichtung benötigt. Teilweise werden die Anlagen durch Dickenmessgeräte, Signiervorrichtung und Muffanlagen ergänzt [6]. Für die Produktion von PVC-U-Rohren werden Doppelschneckenextruder mit einer Länge von bis zum 36fachen des Schneckendurchmessers (36D) eingesetzt. Eine Neuerung stellen Extruder mit zwei Entgasungszonen dar, dies kann vor allem bei hochgefüllten Materialien zu einer besseren Anplastifizierung führen [7]. Zur Herstellung von Rohren aus PVC-U werden von den Werkzeugen mit kreisringspaltförmigem Austrittsquerschnitt fast ausschließlich Dornhalterwerkzeuge, auch Stegdornhalter- oder Tragringwerkzeug genannt, eingesetzt. Die Rohrwerkzeuge werden aus hochlegiertem Vergütungsstahl hergestellt. Flächen die mit der Kunststoffschmelze in Berührung kommen, werden hartverchromt. Draht- und Kabelummantelungsanlagen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Ablauf- und Aufwickelvorrichtungen von herkömmlichen Extrusionsstraßen [6].

Extrusion von Platten und Flachfolien

Folien sind ebene, flächenhafte Erzeugnisse bis zu 1 mm Dicke, über 1 mm Dicke spricht man von Platten. PVC-Folien werden vorwiegend im Verpackungsbereich eingesetzt. Eine herausragende Eigenschaft der PVC-U-Folien ist deren Warmformbarkeit. Dadurch lassen sich sehr gut tiefgezogene Verpackungen herstellen. PVC-Platten, auch Tafeln genannt, werden als Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. PVC-Folien werden im Allgemeinen auf Mehrwalzanlagen, Kalandern hergestellt. Dünn- und Schrumpffolien werden jedoch im Blasfolienextrusionsprozess gefertigt, auch PVC-P-Folien können inzwischen wirtschaftlich mittels Extrusion hergestellt werden.

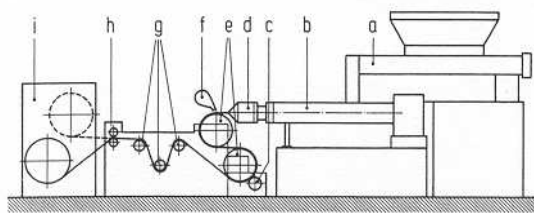
Bei der Blasfolienextrusion wird das PVC-Compound im Extruder plastifiziert, die Schmelze in einem Blasfolienkopf zu einem Folienschlauch verformt. Der Schlauch wird mittels Luft aufgeweitet, flachgelegt, abgequetscht und schließlich aufgewickelt. Das Blasfolienextrusionsverfahren kann vertikal aufwärts und sehr selten auch horizontal erfolgen. Bei der Herstellung von Folien aus PVC-U hat sich die horizontale Arbeitsweise durchgesetzt. Bei den PVC-P-Folien wird die vertikale aufwärts Arbeitsrichtung eingesetzt. Die Extruder für die Herstellung von Blasfolien unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen für die Herstellung anderer Halbzeuge. Für Feinfolien werden Extruder mit geringer Ausstoßleistung eingesetzt. Für die Folienextrusion werden üblicherweise Einschneckenextruder eingesetzt. Es werden hauptsächlich eingängige Dreizonenschnecken verwendet, teilweise auch zweigängige Schnecken. Die für die Blasfolienextrusion eingesetzten Doppelschneckenextruder arbeiten mit dichtkämmenden, gegenläufigen Schnecken [6].

Platten und Flachfolien werden nach dem Extrusionsverfahren mit einer Breitschlitzdüse hergestellt. Platten können aus PVC-U und PVC-P gefertigt werden. Gedeckte Platten aus PVC-U und schlagzähem PVC werden mit glatter Oberfläche oder einer Oberflächenbehandlung durch Prägen oder Laminieren mit Folien hergestellt. PVC-P wird beispielsweise zu Fußbodenplatten verarbeitet. Eine Anlage zur Herstellung von Platten und Tafeln besteht im Wesentlichen aus den folgenden Bestandteilen:

- Extruder
- Breitschlitzdüse: hat die Aufgabe, die Schmelze auf die entsprechende Breite zu verteilen und in gleichmäßiger Dicke und Austrittsgeschwindigkeit zu verformen.
- Glättwerk: festigt die Schmelze, glättet die Oberfläche der Warenbahn und zieht sie spannungsfrei ab

- Rollenbahn
- Abzug
- Quertrenneinrichtung.

Diese Verfahrensmerkmale gelten auch für die Extrusion von Flachfolien. In Abbildung 1 ist das Prinzip einer Flachfolien-Extrusionsanlage dargestellt. Abweichungen sind in der Bauform der Breitschlitzdüse, dem Glättwerk und dem Abzug möglich. Als Plastifiziereinheit werden vorwiegend Doppelschneckenextruder benutzt. Das wichtigste Bauteil der Plattenanlage ist die Breitschlitzdüse. Die Verteilung der Schmelze in der Düse erfolgt über einen Verteilerkanal, der die Form eines Kleiderbügels oder Fischeschwanzes haben kann. Der Unterschied der Plattenanlage zur Flachfolienanlage besteht in der Verwendung eines Glättwerks statt der Chill-Roll-Einheit und einer Düse mit feststehender Lippe [6]. PVC-Plattenanlagen werden für Breiten von 1220 mm bis 2050 mm eingesetzt und geliefert. Teilweise können auch Breiten von 3 m realisiert werden [4].



- a: Schnecken-Dosiergerät
- b: Extruder
- c: Gummi-Andruckwalze
- d: Folien-Breitschlitzdüse
- e: Chill-roll-Walzen
- f: Luftrakel
- g: Umlenkwalzen
- h: Schneidvorrichtung
- i: Folienwickler

Abbildung 1: Prinzip einer Flachfolien-Extrusionsanlage [6]

Extrusion geschäumter Profile, Rohre und Platten

Die Verschäumung bietet bei Halbzeugen aus PVC geringe Volumenkosten, höhere Steifigkeit durch Querschnittsvergrößerung bei gleichem Metergewicht, leichtere mechanische Bearbeitbarkeit und geringere Wärmeleitfähigkeit. Geschäumte Profile werden beispielsweise als Dichtungsprofile im Bausektor eingesetzt. Geschäumte Halbzeuge aus PVC werden weitgehend unter Verwendung chemischer Treibmittel hergestellt. Man unterscheidet ein Verfahren der freien Aufschäumung und ein Verfahren der inneren Aufschäumung. Bei der freien Aufschäumung expandiert die Schmelze nach dem Austritt aus der Düse frei. Die Aufschäumung wird durch das Quellen und die elastische Rückdeformation des Extrudats überlagert. Bei dem Verfahren der Aufschäumung nach innen wird das Halbzeug unmittelbar nach dem Verlassen des Düsenwerkzeugs an der gesamten Oberfläche stark abgekühlt. Dadurch wird eine Zellbildung an der Extrudatoberfläche unterdrückt, eine gleichzeitige Kalibrierung verhindert eine Vergrößerung des Extrudatquerschnitts. Für die Extrusion geschäumter Halbzeuge aus PVC werden Ein- und Doppelschneckenextruder eingesetzt. Die Düsenwerkzeuge haben die Aufgabe, die treibmittelhaltige PVC-Schmelze zum gewünschten Halbzeugquerschnitt zu formen. Wichtig ist, dass der Werkzeugquerschnitt bis zum Düsenaustritt gleichmäßig abnimmt.

Coextrusion

Bei dieser Verarbeitung werden mindestens zwei verschiedene Massen koextrudiert. Typische Produkte der PVC-Coextrusion sind beispielsweise Profile oder Rohre mit Rezyklatkern und Neuware außen, anextrudierte weiche Dichtlippen an harten Profilen, PVC-Schaumkernrohre mit kompakter Außenschicht und PVC-Profile mit coextrudierter PMMA-Deckschicht [3]. Auch PVC-P-Folien können coextrudiert werden. Häufig wird für die Coextrusion ein dreiteiliger Aufbau verwendet. Das Beispiel einer PVC-P-Folie für medizinische Anwendungen, eignet sich gut zur Erläuterung der Coextrusion (Abbildung 2). Zur Plastifizierung des Materials werden drei Einschneckenextruder eingesetzt. An den Extruder gliedert sich eine Breitschlitzdüse mit Coex-Adapter an. Die drei Schmelzeströme werden gleichmäßig übereinander gelegt und zu einer Schmelzfahne ausgeformt. Wichtig ist dabei, dass der Schmelze, nachdem sie über die Breite

verteilt wurde, ausreichend Relaxationszeit zur Verfügung gestellt wird. Dadurch können sich eventuell vorhandene Spannungen ausgleichen und Verwerfungen der Folie werden vermieden. Die Chill-Roll-Nachfolgeeinheit kann durch zusätzliche Kühlrollen und eine Folien-Relaxationsstation aufgerüstet werden. Mit Hilfe einer Kühl-Prägewalzenkombination kann der Folie eine definierte Oberflächenstruktur aufgeprägt werden [8].

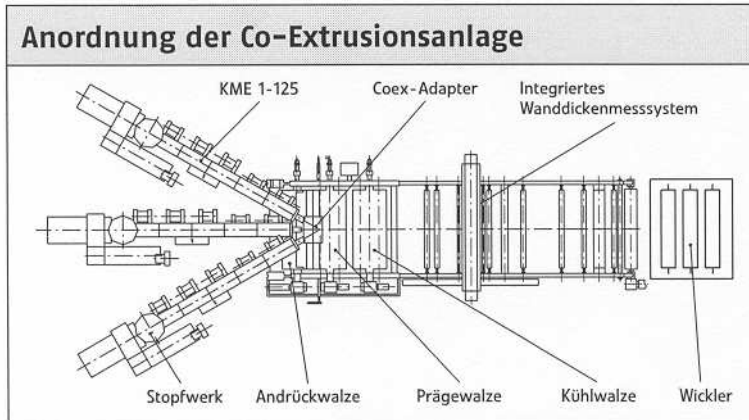


Abbildung 2: Beispiel einer 3-teiligen Coextrusionsanlage [8]

3.2 Spritzguss

Ähnlich wie bei der Extrusion wird die PVC-Mischung in der ersten Phase der Verarbeitung über ein beheiztes Schneckensystem plastifiziert. Anschließend wird die Schmelze direkt in eine Form gespritzt und gekühlt, so dass das feste Fertigteil der geöffneten Form entnommen werden kann.

Für die Verarbeitung von PVC im Spritzgussverfahren werden spezielle korrosionsgeschützte Plastifizieraggregate mit geringer Kompression und meist ohne Rückstromsperre eingesetzt. Typische Produkte aus diesem Verarbeitungsverfahren sind Rohrleitungs-Fittings, Gehäuse, WC-Spülkästen und Gartenmöbel [3].

Die Ausstattung der Anlagentechnik unterscheidet sich nicht von der einer Spritzgussmaschine für andere Formmassen. Sie setzt sich aus der Grundkonfiguration bestehend aus Steuerung, Plastifizieraggregat, Schließeinheit und Spritzgusswerkzeug zusammen. Beispielhaft ist in der Abbildung 3 der Zyklusablauf beim Spritzgießen gezeigt.

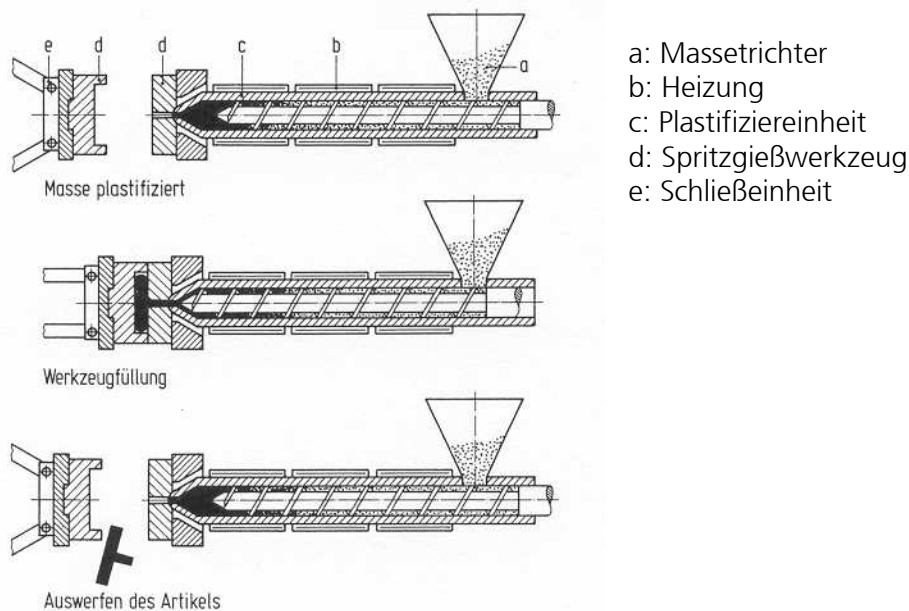


Abbildung 3: Zyklusablauf beim Spritzgießen [6]

Bei der Verarbeitung von PVC auf Spritzgussautomaten gibt es eine Reihe von Besonderheiten in der Maschinenausführung gegenüber der Verarbeitung herkömmlicher Thermoplaste.

So setzt man üblicherweise für PVC-U ausschließlich Aggregate mit offener Düsenausführung ein, während bei der Verarbeitung von PVC-P hauptsächlich Verschlussdüsen zum Einsatz kommen.

Der Zylinder und die Schnecke werden aus korrosionsbeständigen Nitrierstählen gefertigt. Gegebenenfalls werden Teile der Maschine vernickelt. Durch diese Verfahren erhält man hochbeständige Oberflächen, die eine bessere PVC-Verarbeitung ermöglichen.

Für die PVC-Verarbeitung werden vor allem besondere Dreizonen-Plastifizierschnecken eingesetzt, die auf die Verarbeitung von PVC-U oder PVC-P abgestimmt sind. Man verzichtet vor allem auf Rückstromsperren, um Schmelzerückstände im Plastifizieraggregat zu verhindern. Ebenso ist auf ein mittleres Kompressionsverhältnis zwischen 1,5:1 und 2:1 zu achten. Ein solches Kompressionsverhältnis ermöglicht ein variables Arbeiten mit dem Staudruck und somit ein einfaches Optimieren der Fertigteilqualität. Die PVC-Masse erfährt hierdurch keine zu hohe Schererwärmung und wird nicht geschädigt.

Eine große Rolle für die Schmelzequalität spielt ebenso die Gangtiefe in Abhängigkeit vom Schneckendurchmesser in der Meteringzone. Die Meteringzone ist die Ausstoßzone, also der Bereich der Schnecke am Ende der Plastifizierung. Diese Ausstoßzone zeichnet sich meist durch eine konstante Gangtiefe aus. Zu tief geschnittene Schnecken liefern in dieser Zone thermisch inhomogenes und zu flach geschnittene thermisch überhitztes Material. Die Schnecken für die PVC-Verarbeitung haben allgemein ein Länge-zu-Sneckendurchmesser-Verhältnis (L/D) von 16 bis 22D, vorzugsweise 18 bis 20D. Die wirksame Schneckenlänge soll sich bei maximalem Dosiervolumen um ca. 3 D bis maximal 5 D verkürzen, da sonst mit einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung der Schmelze im Stauraum zu rechnen ist. Die Gangsteigung beträgt üblicherweise 1 D.

Die Zonen der PVC-Verarbeitungsschnecken teilen sich normalerweise in gleich lange Einzugs- und Kompressionszonen auf. Die Austragszone macht ca. 3D aus.

Bei Schneckendurchmessern über 70mm ist eine Schneckentemperierung empfehlenswert, um homogene Massetemperaturverteilungen zu erreichen.

Da bei der PVC-Verarbeitung ein möglichst vollständiger Austrag der Schmelze erreicht werden sollte, haben sich Sonderformen der Schneckenspitzen mit einem Winkel von ca. 17° bewährt, die zusätzlich mit einem Schneckengang zur Förderung versehen sind. Durch diese Bauform wird eine bessere Wärmeabfuhr erreicht und ein Rückfluss der Schmelze (Leckströmung) vermieden. In vorderer Schneckenstellung ist konstruktiv auf einen sehr kleinen Restspalt (~0,3mm) zu achten, damit eine praktisch vollständige Entleerung der Plastifiziereinheit erreicht wird.

Die Drücke und Geschwindigkeiten der Spritzgussautomaten sind mit denen bei der Verarbeitung von anderen Thermoplasten vergleichbar.

Auch die Einteilung und der Aufbau der Spritzgusswerkzeuge für PVC unterscheidet sich kaum bis gar nicht von denen anderer Thermoplaste. Bei der Konzeption der Werkzeuge ist dem relativ schlechten Fließverhalten und der thermischen Empfindlichkeit von PVC Rechnung zu tragen. Somit ist auf hochwertige Werkzeugoberflächen, strömungsgünstige Querschnitte und Geometrien der Angusskanäle sowie eine gleichmäßige Temperierung zu achten.

Für die Formnester der PVC-U-Werkzeuge ist eine Schwindung von 0,4-0,5% zu berücksichtigen, bei PVC-P-Werkzeugen muss je nach PVC-Rezeptur von 1-4% Schwindung ausgegangen werden.

Werkzeugteile, die direkt mit der PVC-Schmelze in Berührung kommen, sind aus korrosionsbeständigen Stählen auszuführen, die zusätzlich polierbar sind, um besseres Fließverhalten zu ermöglichen.

Die Angussysteme für die PVC-Verarbeitung unterscheiden sich lediglich im Detail von denen anderer Thermoplaste. Auch an dieser Stelle ist auf das Vermeiden unnötiger Scherung zu achten. Konizitäten gewährleisten den erwünschten Quellfluss während der Füllphase.

Für die Herstellung von Formteilen ist PVC-U ein idealer Werkstoff, der sowohl für Verpackungen als auch für technische Einsatzgebiete geeignet ist. Die herausragenden Werkstoffeigenschaften sind vor allem:

- gute Chemikalienbeständigkeit
- hohe Steifigkeit
- hohe Oberflächenhärte
- geringe Spannungskorrosionsneigung
- gute Verklebbarkeit
- gute Verschweißbarkeit
- Bedruckbarkeit
- Schwerentflammbarkeit
- Hohe UV- und Witterungsbeständigkeit

PVC-U kann durch gezielte und genaue Additivierung auf die späteren Einsatzbedingungen eingestellt werden. Bei der Spritzgussverarbeitung kommen vorwiegend S- und M-PVC zur Verwendung, die meist in poröser Pulverform vorliegen.

Wegen des diskontinuierlichen Verfahrens im Spritzguss und der thermischen Empfindlichkeit von PVC ist auf ausreichende Stabilisierung zu achten, um einen thermischen Abbau zu verhindern.

Bei der Verarbeitung sollen reproduzierbare Spritzgussteile erzeugt werden. Daher ist wie bei den meisten Thermoplasten auf die Konstanz der folgenden Verarbeitungsparameter zu achten:

- gleich bleibendes Temperaturniveau, damit gleichmäßige Viskosität erreicht wird, die für das Fließ- und Formfüllverhalten unter dem Einfluss des Spritzdrucks erforderlich ist
- möglichst hoher Formeninnendruck
- schnellstmögliche Einspritzgeschwindigkeit, damit der Nachdruck möglichst lange wirken kann
- möglichst geringes Dosiervolumen, um eine vollständige Schmelzeentleerung zu gewährleisten
- möglichst kurze Zykluszeit

Um optimale Verarbeitung zu garantieren ist es notwendig, Massetemperaturen von 190 bis 210 °C zu erreichen. Die Schmelztemperatur sollte unmittelbar unter der Zersetzungstemperatur liegen, weil bei zu niedriger Temperatur durch höhere Viskosität ein höherer Scherenergieeintrag stattfindet. Dadurch treten nicht nur Materialabbau, sondern auch Kaltverschiebungen und Inhomogenitäten auf, die Spritzgussteile mit niedrigen mechanischen Eigenschaften und späterer Verzugsneigung verursachen. Eine optimale Schmelztemperatur ist an einem teigartigen Ineinanderfließen der ausgeprägten Masse erkennbar.

Beim Einspritz- und Nachdruck sowie der Einspritzzeit sind bei PVC keine besonderen Einstellungen notwendig. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass eine Überladung des Formteils vermieden wird, da diese zu Spannungsrissen führen kann.

Die Höhe der Werkzeugtemperatur kann nicht nur die Zykluszeit, die Oberflächenbeschaffenheit und die Schwindung, sondern auch den Formfüllgrad und die Formfüllgeschwindigkeit beeinflussen. Die Werkzeugtemperatur zur Regulierung des Formfüllvorgangs ist beim PVC deshalb so wichtig, weil oft eine Erhöhung der Massetemperatur mit der Gefahr einer thermischen Zersetzung verbunden ist. Die Form kann somit einwandfrei gefüllt werden, da der Fließwiderstand durch langsames Abkühlen verringert wird. Besonders wichtig ist eine Werkzeugtemperierung zur Festigkeitserhöhung bei Teilen mit Bindenähten.

Bei der Verarbeitung von PVC-P gelten die gleichen Regeln wie bei der Verarbeitung von PVC-U, allerdings genügt wegen der niedrigen Schmelzviskosität weichgemachter Compounds ein niedrigeres Temperaturniveau. Eine Schädigung durch Temperatur und Scherung erfolgt dadurch in weit geringerem Maß.

Während der Aufschmelzvorgang gut zu beherrschen ist und der Einspritzvorgang mit hoher Geschwindigkeit vollzogen werden kann, gelten aufgrund der Kompressibilität der Schmelze in der Form andere Gesetzmäßigkeiten. Trotz des Einfrierens der Schmelze ist sie noch kompressibel, so dass Material am Anschnitt nachgedrückt werden kann. Solche Teile sind sehr spannungsreich und der Volumenschwund bewegt sich an der oberen Toleranzgrenze. Daneben treten Spannungen, Verzug, Verwerfungen oder optische Effekte auf. Um diese Fehler zu vermeiden, muss der Spritzdruck kurz vor der Formfüllung verringert werden. Auf den Nachdruck wird während des Abkühlens vollständig verzichtet. Gut gefüllte und nicht überladene Formen ergeben Teile mit geringer Schwindung, überfüllte dagegen spannungsbehaftete und verzugsfreudige [6].

3.3 Kalandrieren

Das Kalandrieren von PVC hat eine große Bedeutung insbesondere für die Herstellung von Schwerfolien, Platten, Fußböden und Kunstleder [3]. Das Kalanderverfahren ist das technisch und ökonomisch beste Verfahren, wenn man Folien mit geringen Dickentoleranzen anfertigen will.

Das Kalandrieren von PVC-Mischungen in einem thermoplastischen Verarbeitungsbereich von 160 bis etwa 220°C zwischen den Walzenspalten eines Mehrwalzenkalenders stellt in erster Linie einen Verformungsvorgang dar, dem Mischungs-, Homogenisier- und Plastifiziervorgänge schon vorausgegangen sind. Für eine einwandfreie PVC-Verarbeitung auf dem Kalandrier sind eine hinreichende Homogenisierung und ausreichende, aber dennoch schonende Plastifizierung wichtig. Die Technologie des Kalandrierens lässt sich in folgende Verfahrensschritte aufteilen:

- Zubereitung der PVC-Mischung mit Additiven und Mischungszubereitung im Mischer
- Homogenisierung und Plastifizierung in einem dem Kalandrier vorgeschalteten Plastifizieraggregat wie Knetzer, Extruder oder Walzwerk
- Ausformen der Folie auf dem Kalandrier.

Die PVC-Massen müssen für die eigentliche Ausformung auf dem Kalandrier eine ausreichend hohe Viskosität und einen breiten Erweichungsbereich haben. PVC-Mischungen weisen ausreichend hohe Schmelzviskositäten bei den in Betracht kommenden Schergeschwindigkeiten auf. Das Auswalzen der Folien geschieht auf Kalandriern, diese werden wegen der Ähnlichkeit der Anordnung der Walzen (siehe Abbildung 4) mit der Form der Buchstaben als I-, F-, L-, S- oder Z-Kalandrier bezeichnet.








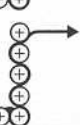


Bauform	Bevorzugter Einsatz
 2-Walzenkalandrier, I-Form	
 3-Walzenkalandrier, I-Form	Fußbodenbeläge
 4-Walzenkalandrier, I-Form	PVC-hart-Folien
 4-Walzenkalandrier, F-Form	PVC-weich-Folien
 4-Walzenkalandrier, F-Form mit nachgestellter Brustwalze	
 4-Walzenkalandrier, L-Form	PVC-hart-Folien
 5-Walzenkalandrier, L-Form	
 6-Walzenkalandrier, L-Form	
 4-Walzenkalandrier, Z-Form	PVC-weich-Folien
 4-Walzenkalandrier, S-Form	PVC-hart- und -weich-Folien

Abbildung 4: Kalandrierbauformen [6]

Das Auswalzen der Folien kann im technologisch einfachsten Fall in einem Zwei-Walzen oder Drei-Walzen-Kalandrier in I-Form erfolgen. Qualitativ hochwertige Folien lassen sich jedoch fast

nur auf Vier-Walzen-Kalandern herstellen. Für die Produktion von PVC-U-Folien werden häufig Vier- bis Sieben-Walzen-Kalander in L-Form eingesetzt. PVC-P wird oftmals mit Vier-Walzen-Kalandern in F-Form verarbeitet. Der Vorteil des L-Kalanders für PVC-U liegt im niedrig liegenden Beschickungsspalt, im kurzen Beschickungsweg und in der großen Umschlingung von Walze 2. Für eine einwandfreie Verarbeitung der plastifizierten PVC-Mischung zu Folien hoher Qualität (wenig Fließlinien, frei von optischen Inhomogenitäten) muss eine gleichmäßige Temperierung der einzelnen Kalandervalzen erreicht werden. Bei der Kalandrierung von PVC sinkt die für die Verarbeitung erforderliche Temperatur mit steigendem Weichmacheranteil, so dass PVC-U-Mischungen bei höheren Temperaturen auf dem Kalander verarbeitet werden als PVC-P.

Herstellung von PVC-U-Folien

Für das Kalandrieren von Hartfolien unterscheidet man das Hochtemperatur (HT)-Verfahren und das Niedertemperatur (NT)-Verfahren. Beim Hochtemperatur-Verfahren werden die Kalandervalzen mit Temperaturen von 180-220°C betrieben. Das Temperaturprogramm wird bei einem Vier-Walzen-Kalander so gewählt, dass von der ersten bis zur dritten Walze in Intervallen von ca. 5°C die Walzentemperatur ansteigt und die letzte Walze mit niedrigerer Temperatur als die vorletzte Walze gefahren wird. In Sonderfällen können auch Temperatursprünge von 10°C zwischen zwei Walzen gewählt werden. Bei mehr als vierstufigen Kalandern werden die Temperaturintervalle auf die Walzen in kleineren Schritten verteilt, wobei die letzte Walze ebenfalls eine niedrigere Temperatur als die vorletzte Walze besitzt. Bei Mehrwalzenkalandern werden die einzelnen Walzen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefahren. Beim HT-Verfahren, bildet sich vor dem Walzenspalt ein rollender „Knet“. Je gleichmäßiger und ruhiger der Knet im Walzenspalt rotiert, umso fließlinienärmer ist die optische Qualität einer Glasklarfolie.

Beim Niedertemperatur-Verfahren, auch Luvitherm-Verfahren genannt, werden die Walzen mit fallenden Temperaturen betrieben, wobei für das endgültige Ausgelieren und definierte Einstellen der Foliendicke eine Art Schmelzwalze bei Temperaturen von 220 bis 260°C erforderlich ist („Luvithermisierung“ in der „Luvithermwalze“).

Herstellung von PVC-P-Folien

Für die Herstellung von PVC-P-Folien werden überwiegend F-Kalander eingesetzt. Die Verarbeitungstemperaturen liegen ca. 10 bis 20°C niedriger als die von Hartfolien. Das Temperaturprogramm wird aufsteigend gewählt wie beim HT-Verfahren für Hartfolien. Verarbeitungsprobleme können bei der Weichfolien-Verarbeitung mit höherem Weichmachergehalt auftreten. Zur Erzielung einer ruhigen Knetrotation bei ähnlichen Friktionsverhältnissen wie bei der Hartverarbeitung werden vielfach Abmischungen von PVC-Typen mit höheren K-Werten eingesetzt, um fließlinienarme Folienqualitäten auch bei hohen Kalandergeschwindigkeiten zu erhalten.

Herstellung von Bodenbelägen

Die meisten PVC-Bodenbeläge werden nach dem Kalanderverfahren auf Zwei- oder Vier-Walzen-Anlagen produziert. Üblicherweise sind die kalandrierten Beläge ca. 2 mm dick, einfarbig oder mehrfarbig marmoriert kommen sie als Einschichten- oder Mehrschichtenbeläge auf den Markt. Die PVC-Mischungen werden in der Regel in einem Innenmischer aufbereitet. Bei der Herstellung einschichtiger Beläge werden Produktionsstrassen genutzt, in denen verschiedenfarbige Granulate oder Plastifikate hergestellt werden und nach dem Mischen mit einem Zwei-Walzen-Kalander zu Bahnen ausgewalzt werden. Alternativ kann auch ein Mehrwalzenkalander mit Heißgranulaten oder vorplastifizierten Farbmischungen beschickt werden. Mehrschichtige Böden können aus Schichten gleichartiger Folien (homogene Bodenbeläge) oder aus Folien unterschiedlicher Zusammensetzung (heterogene Bodenbeläge) aufgebaut sein. Die einzelnen Schichten werden auf Zwei-Walzen- oder Mehr-Walzen-Kalandern hergestellt. Die Folienschichten werden auf Laminiermaschinen oder Kaschierkalandern unter Anwendung von Druck und Wärme miteinander verbunden. Dabei gelieren die einzelnen Schichten aus. Heterogene Beläge besitzen unterschiedliche Schichten wie transparente oder

füllstoffreiche Verschleißschichten, füllstoffhaltige Unterschichten, PVC-Schaumschichten oder Trägerschichten aus Glasvlies bzw. Textil.

Maschinentechnik

Die Mischung der Rezepturbestandteile erfolgt in diskontinuierlichen langsam oder schnell laufenden Mischern. Zu den langsam laufenden Mischern zählen Bandschnecken und Planetenmischer. Sie haben eine geringe Rotationsgeschwindigkeit, bewirken nur eine geringe Scherung des Materials und bieten somit eine schonende Mischbehandlung. Diese Mischer können für PVC-U und PVC-P eingesetzt werden. Schnell laufende Mischer werden auch als Schnellläufer oder Fluidmischer bezeichnet, dispergieren aufgrund einer hohen Umfangsgeschwindigkeit des Mischwerkzeuges Wärme im Mischgut und werden zur Herstellung von Heißmischungen aus PVC-P und PVC-U verwendet.

Für das Gelieren des Mischgutes werden diskontinuierlich (Stempelknetter) und kontinuierlich arbeitende Maschinen eingesetzt. Über eine Entleerungsöffnung wird das Material automatisch in Form von Klumpen ausgeworfen. Ein nachgeschaltetes Walzwerk dient als Puffer und ermöglicht die kontinuierliche Beschickung des Kalanders. Kontinuierlich arbeitende Geliemaschinen sind Ko-Knetter, Walzenextruder, Sonderbauformen des Innenmischers und Walzwerke. Der Ko-Knetter ist ein spezieller Einschneckenextruder, dessen Besonderheit eine Schnecke mit drei Unterbrechungen pro Schneckensteigung ist. Zu diesen Lücken gibt es korrespondierende Knetbolzen oder -zähne im Knetergehäuse. Durch ein spezielles Getriebe wird jeder Umdrehung der Schnecke eine axiale Hubbewegung überlagert. Durch die verschiedenen Mischeffekte ist eine schonende Mischung des Materials möglich.

Dem Knetter werden oftmals Mischwalzwerke nachgeschaltet. Diese ermöglichen neben zusätzlichen Misch- und Homogenisierungseffekten auch in einfacher Weise die Einarbeitung von Regenerat. Wird der Ko-Knetter verlängert und mit einer Intensiv-Entgasung ausgestattet, ist es möglich den Kalandar direkt mit dem gut entgasten Material zu beschicken. PVC-Mischungen können im Walzenextruder durch ein intensives kurzzeitiges Scheren im schrägverzahnten Walzenteil geliert werden. Die austretenden stark zerklüfteten Stränge werden direkt oder über ein vorgeschaltetes Walzwerk dem ersten Walzenspalt des Kalanders zugeführt.

Beim Gelieren in einem kontinuierlichen Innenmischer wird das Material von zwei kurzen Einzugsschnecken in die Knetkammer transportiert, in der zwei gegenläufige Knetflügel unter hoher Wärmedissipation das Material gelieren. Durch eine Öffnung am vorderen unteren Ende der Mischkammer tritt das gelierte Material aus.

Die Kalandarbeschickung erfolgt hauptsächlich über Förderbänder, die in einer Traversierbewegung dem ersten Kalanderspalt das gelierte Material in Form eines Fellstreifens vom Walzwerk oder in vorgeformter Art von den Knetern zuführen. Ein zwischengeschaltetes Metallsuchgerät verhindert eine Beschädigung der Kalandarwalzen durch Metallteile. Für PVC-P-Folien von besonderer Reinheit wird oft ein Strainer-Extruder eingesetzt, dessen Aufgabe ist es, das gelierte Material durch ein Siebpaket zu drücken und so die Schmelze von Schmutzpartikeln oder anderen Feststoffen zu reinigen.

Die wichtigsten konstruktiven Bauelemente des Kalanders sind Ständer, Walzen, Antrieb sowie Hilfsvorrichtungen zur Walzenspaltverstellung. Die Kalandarständer bilden das Gerüst des Kalanders und dienen der Aufnahme der Walzenlager. Beide Walzenständer haben eine ebene Traverse und sind mit einem Träger im Fundament verbunden. Um die auftretenden Belastungen aufnehmen zu können werden die Ständer aus hochwertigem Stahlguss gefertigt. Außer den Walzenlagern müssen Zusatzeinrichtungen für die Walzenvorspannung, die Walzengegenbiegeeinrichtung und die Schrägverstellung aufgenommen werden. Die wichtigste Größe bei der Auslegung einer Kalandaranlage ist die maximal zu erwartende Spaltbelastung. Für die Kalandarwalzen bestimmen diese Werte bei vorgegebener Walzenbreite den Walzenwerkstoff, die Abmessung des Walzenzapfens, die Dimensionierung der Walzenlagerung und den Durchmesser des Walzenballens. Höchste Anforderungen werden an die Oberflächengüte der Walze gestellt, da sie weitgehend die Qualität der Folie bestimmt. Die Oberflächen der

Walzen sind entweder geschliffen oder verchromt und poliert. Für die Fertigung von matten Folien werden Walzen mit mattierter Oberfläche eingesetzt. Die Mattierung der Walze wird elektrolytisch oder durch Strahlen mit Glasperlen oder Aluminiumoxid erzielt. Je nach Belastung werden Kalandervalzen aus Hart- oder Verbundguss, bestehend aus Hartgusschale und Sphärogusskern, gefertigt. Für hochbelastbare Kalandervalzen zur Verarbeitung von PVC-U wird Chrom-Molybdän-legierter und geschmiedeter Stahl mit einem hohen E-Modul verwendet. Die Walzen lagern auf mehrreihigen Zylinderrollenlagern. Zur Beheizung der Walzen werden diese dicht an der Oberfläche gebohrt. Der Wärmeträger (Heißwasser oder Thermoöl) zirkuliert mit hoher Geschwindigkeit in den Bohrungen. Dadurch wird ein schneller Wärmeaustausch und eine hohe Temperaturgenauigkeit auf der Walzenoberfläche erreicht. Die Walzen können auch mit Heißdampf temperiert werden. Die Kalandervalzen werden durch einzelne drehzahlregelte Gleichstrommotoren angetrieben, die am Getriebegehäuse angeflanscht sind. Die Kraftübertragung vom Getriebe auf die Kalandervalzen erfolgt über Gelenkwellen.

Die Spaltlast bewirkt ein Durchbiegen der Walzen. Zur Kompensierung der Durchbiegung werden die Schrägverstellung der Walzen (Roll crossing), die Walzengegenbiegeeinrichtung (Roll bending) und eine fest vorgegebene Walzenbombe eingesetzt. Die Schrägverstellung von zwei Walzen erfolgt durch seitliches Verschieben einer Walze gegenüber einer feststehenden Walze, so dass ihre Achsen leicht gekreuzt sind. So bleibt der Spalt in der Ballenmitte unverändert, während er zum Ballenende hin größer wird. Die Schrägverstellung wird an der ersten oder vorletzten Walze angewendet. Walzenbiegeeinrichtungen bestehen aus einem zusätzlichen mit Pendelrollenlager versehenen Hilfslager, das auf dem Walzenzapfen in einem fixierten Abstand zum Hauptlager montiert ist. Hydraulikzylinder drücken über dieses Hilfslager auf die Walze und bewirken, dass die Spaltweite zur Ballenmitte verkleinert wird. Diese Vorrichtung wird vorzugsweise an der letzten Kalandervalze oder an der zweiten Walze eines L-Kalanders eingesetzt. Da durch diese Hilfsmittel die Durchbiegung über die gesamte Ballenlänge nicht ausreichend kompensiert wird, erhält meist die letzte Walze noch eine Bombe bzw. ein modifiziertes Walzenprofil.

Durch die Kalandernachfolgeeinrichtungen wird die Folie von der letzten Kalandervalze abgenommen, mit oder ohne Verstreckung abgezogen, gegebenenfalls geprägt und auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei allen Folgeeinrichtungen dürfen nur geringe Bahnspannungen auf die Folie einwirken. Die Abzugsvorrichtung besteht meist aus drei bis zehn oder mehr Walzen, die einzeln oder in Gruppen zu zwei oder drei Walzen angetrieben und mit getrennten Heizkreisen versehen werden. Der Abzug befindet sich achsparallel hinter der letzten oder vorletzten Kalandervalze und zieht die Folie geradlinig unter definierten Geschwindigkeits- und Temperaturverhältnissen ab.

Die Prägevorrichtung besteht aus einer gravierten temperierten Stahlwalze und einer gekühlten Gummiendruckwalze. Der Folie wird im thermoelastischen Bereich durch den vorgegebenen Prägedruck die Gravur aufgeprägt. Die Prägetemperatur wird durch die Abzugswalzen eingestellt. Um Wärmeverluste zu vermeiden, ist das Prägewerk direkt hinter den Abzugswalzen angeordnet. Es muss mit geringsten Bahnspannungen gearbeitet werden, da sich die Folie im thermoelastischen Bereich befindet.

Der Rollengang besteht aus fünf bis zehn Rollen und transportiert die Folie von der Abzugsvorrichtung bzw. der Prägeeinheit zu den Kühlwalzen. Die Rollen bestehen aus einfachen Stahlrollen mit mattverchromten oder PTFE-beschichteten Oberflächen und haben einen gemeinsamen Antrieb. Die Kühlstrecke wird durch eine Anzahl von Temperier- und Kühlrollen, welche entsprechend den unterschiedlichen Verfahrenstechniken verschieden angeordnet sind, gebildet. Die Folie wird so stufenweise auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach der Kühlstrecke erfolgt die automatische Dickenmessung der Folie. Durch Randbeschnitt wird die Folie vor dem Aufwickeln auf die gewünschte Breite geschnitten. Folienränder haben eine größere Dicke und müssen zur Erzielung eines gleichmäßigen Wickels beschnitten werden. PVC-P wird durch Quetschmesser, PVC-U mit Scherenschnitt oder Rasierklingschnitt am Rand besäumt.

Randstreifen werden gesondert aufgewickelt oder pneumatisch abgesaugt. Zum Aufwickeln der Folie werden vorwiegend Zentralwickler mit zwei bis drei Wickelstellen eingesetzt.

Nach dem NT-Verfahren hergestellte Folien werden erst nach dem Abziehen von der letzten Kalandrierwalze thermisch vergütet. Dazu werden sie im Kontakt mit mehreren beheizten kleinen Schmelzwalzen kurzzeitig auf eine hohe Temperatur erwärmt. Diese Nachbehandlungseinheit kann in die Abzugseinheit integriert werden. Hinter den Schmelzwalzen sind die Walzen der Abzugsvorrichtung angeordnet, die die Folie schrittweise abkühlen. Die monoaxiale Reckung einer kalandrierten Folie erfolgt in einer Reckmaschine, welche in die Kalandernachfolge integriert ist.

Extruder-Kalander-Kombinationen bestehen aus einem Walzenextruder als Plastifiziereinheit und einem Drei-Walzen-Kalander mit Folgeeinrichtungen, die in ihren Konstruktionsmerkmalen denen der Großkalander entsprechen. Die Walzenanordnung entspricht einem I-Kalander in schrägliegender Form. Zur Reduzierung der Antriebsleistung und der Spaltlast wird häufig das Prinzip der Walzen mit ungleichen Durchmessern angewendet. Dadurch entsteht eine kleinere Knetvorlage in den beiden Walzenspalten, die so zu einer guten Folien-Oberflächenqualität beiträgt. Die sonstigen Konstruktionsmerkmale und Nachfolgeeinrichtungen sind im Prinzip gleich denen von Großkalandern. Zur Vorplastifizierung werden Walzenextruder mit Austragsteil und Entgasungsstufe oder Zweistufen-Walzenextruder mit Austragsteil in Kaskadenform eingesetzt. Die Schmelze wird zum Einspeisen in den Walzenspalt mit Breitschlitzdüse, Mehrfach-Runddüse oder durch Strangdüse ausgeformt.

Die Herstellung mehrschichtiger Folien kann direkt am Kalander oder in einer separaten Dublier-(Kaschier-)Maschine erfolgen. Zur Dublierung am Kalander für die Fertigung dickerer Folien z.B. für den Bausektor wird eine bereits kalandrierte Folie über Vorheizwalzen auf eine geeignete materialspezifische Temperatur erwärmt und spannungsfrei an die letzte Kalandrierwalze herangeführt. Mit Hilfe einer gummierten Anpresswalze wird die Folie mit der frisch kalandrierten Folie verschweißt. Mit der gleichen Verfahrenstechnik können auch Lamine hergestellt werden. Dazu wird der zu beschichtende Träger erwärmt, gegebenenfalls mit einem Haftvermittler versehen und an der letzten Kalandrierwalze mit der frisch kalandrierten Folie kaschiert. Die Dublierung oder Laminierung kann auch vom Kalandrierprozess entkoppelt durchgeführt werden. Dazu ist es erforderlich, die zu miteinander verbindenden Bahnen gesondert aufzuheizen und im Kaschierwerk unter Druck zu verbinden. An die Dublierung und Laminierung schließt sich oft noch eine Prägung an. Mit einer kontinuierlichen Rollenpresse (AUMA) kann die Dublierung oder Laminierung ohne Vorheizen der zu verbindenden Bahnen durchgeführt werden. Die kontinuierliche Rollenpresse besteht aus einer Heitztrommel und einem endlosen Druckband aus Stahldrahtseil-Gewebe, welches mit einer hitzebeständigen Gummiauflage belegt ist. Das Druckband umschlingt die Heitztrommel und presst die zu verschweißenden Bahnen gegen die Heitztrommel. Solche Anlagen finden auch Anwendung bei der Herstellung von Fußbodenbelägen aus kalandrierten PVC-P-Folien [6].

3.4 Blasformen

Der Herstellungsprozess entspricht weitgehend dem von anderen Thermoplasten her bekannten Blasformprozess. Allerdings kommen bei der Material-Plastifizierung ebenfalls spezielle an PVC angepasste Extruder zum Einsatz [3].

Mit dem Hohlkörperblasformen können aus PVC vielseitige Hohlkörper hergestellt werden. Es dominieren Behälter bis 2 l, selten bis 5 l. Diese Behälter werden zum Großteil mit dem Extrusion-Hohlkörperblasformen hergestellt. Daneben können Hohlkörper auch mit dem Spritzblasverfahren und Streckblasverfahren hergestellt werden.

Extrusions-Hohlkörperblasformen

Beim Extrusions-Hohlkörperblasformen wird eine mit Einfach- oder Doppelschnecke unter Druck und Temperatur plastifizierte PVC-Schmelze über eine oder mehrere Ringdüsen zu einem oder mehreren kontinuierlich austretenden Schlauchrohlingen verformt. Der oder die plastischen Rohlinge werden im Takt von einem oder mehreren zweiteiligen Formwerkzeugen ergriffen und nach Formschließen über einen oder mehrere Blasdorne mit Druckluft aufgeblasen sowie durch Abkühlung an den Formwänden fixiert. Die Verformung erfolgt im thermoplastischen Bereich, verfahrensbedingt können bis zu 30% und mehr Boden- und Halsabfall (Butzen) entstehen. Dieses Verfahren ist universell einsetzbar und wegen seines direkten Weges sehr wirtschaftlich. Auch Artikel aus PVC-P, vorwiegend für den technischen Bereich, lassen sich einfach im Extrusionsblasverfahren herstellen.

Für das PVC-Extrusion-Hohlkörperblasformen werden Extruder (Plastifiziereinheit), Extrusionswerkzeug, Blasvorrichtungen und Werkzeug benötigt. Das konventionelle Extrusionsblasen von PVC ist auf Einschnecken-Plastifiziereinheiten (hauptsächlich Horizontalextruder) und auf Doppelschnecken-Plastifiziereinheiten (mit konischen oder zylindrischen Schnecken) möglich. Für die PVC-Verarbeitung ist es wichtig, dass die Anlagen gegen Korrosion durch die PVC-Schmelze geschützt sind. Wichtig ist dies besonders bei Teilen wie Zylinderrohren und Schnecken, die mit der Schmelze in Berührung kommen. Diese Teile werden aus Nitrierstahl hergestellt und die Oberfläche mit einer Gasnitrierung gehärtet. Schneckenrund und Flanken werden hartverchromt und hochglanzpoliert. Es werden Zwei- und Dreizonenschnecken mit einer Länge von 15 bis 24 D eingesetzt. Die Schneckenspitze ist kegelig glatt mit Kegelwinkeln zwischen 40 und 60°. Ein Krümmer bildet das Übergangsstück zwischen horizontalem Extruder und vertikalen Extruderwerkzeug. Sein Durchmesser ist abhängig von der Extrudergröße. Das Extruderwerkzeug (Kopf) besteht aus einem Torpedostück mit Halterung (Dornsteghalter), ein- oder mehrteiligen Gegenstücken sowie Düse und Kern. Blasformwerkzeuge werden aus Stahl oder Aluminium gefertigt. Wegen des geringen Gewichtes haben sich Formen aus hochverdichtetem, geschmiedetem Aluminium durchgesetzt. Die Anzahl der Formnester richtet sich hauptsächlich nach der Ausstoßleistung des Extruders.

Beim Spritz- und Streckblasen von Hohlkörpern aus PVC gelten für Plastifizier- und Werkzeugtechnik sinngemäß die Ausführungen zum Spritzgießen bzw. Hohlkörperblasformen.

Spritzblasverfahren

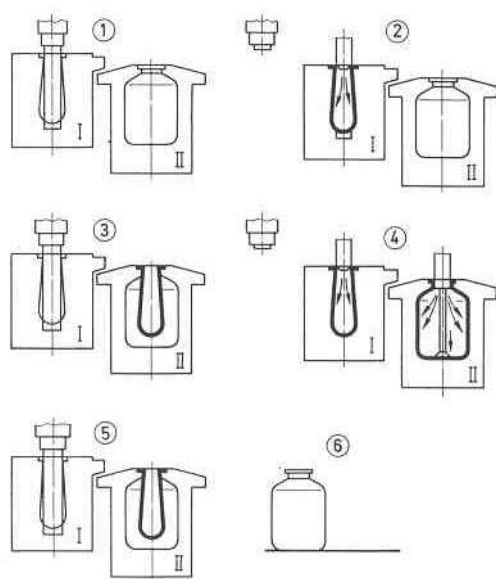
Bei der Herstellung von Hohlkörpern nach dem Spritzblasverfahren werden Vorformlinge bei Werkzeugtemperaturen von 100 bis 120°C nach dem Spritzgussverfahren hergestellt. Formenkerne mit den temperierten Vorformlingen werden über Schieber- oder Drehmaschinen den Blasformen zugeführt und mittels Blasluftzuführung durch die Formenkerne zu den Hohlkörpern umgeformt. Während des Blasvorgangs werden weitere Vorformlinge gegossen. Bei diesem Verfahren entstehen keine Boden oder Halsabquetschungen und die Wanddickenverteilung ist gleichmäßig. Durch Verstreckung im thermoelastischen Bereich weisen spritzgeblasene Fertigteile verfahrensbedingt hohe Fallbruch-, Berstdruck- und Stauchdruckfestigkeiten. Etwas begrenzt ist dieses Verfahren bei der Gestaltung von Griffflaschen.

Beim Spritzblasen von PVC unterscheidet man die Fertigung mit Spritzblaswerkzeugen auf handelsüblichen Spritzgießmaschinen sowie auf Einzweckspritzblasmaschinen. Beim ersten Fall stellt das Spritzblaswerkzeug eine selbständige Funktionseinheit dar. Die Spritzlinge werden durch Schwenken der Dornträgereinheit um 180° in die Blasform überführt. Bei solchen Konstruktionen laufen Spritzguss- und Blasformprozess gleichzeitig ab. Bei den Einzweckspritzblasmaschinen sind die Dornträgerelemente um 180° oder 120° drehbar. Maschinen mit 180° Schwenkwinkel sind Zweistationenanlagen. Bei einem Schwenkwinkel von 120° dreht sich ein dreieckiger Tisch, an jeweils einer Seite des Tisches wird der Vorformling gespritzt, geblasen und abgestreift. Diese Vorgänge laufen simultan ab.

Streckblasverfahren

Streckblasverfahren stellen Varianten des Extrusions- bzw. Spritzblasformens dar, bei denen unter der Verwendung einer Reckhilfe ein biaxiales Verstrecken des Vorformlings durchgeführt wird. Streckblasen ist ein Blasformverfahren, das von einem Vorformling ausgeht. Dieser kann durch Spritzguss, Extrusion oder Extrusionsblasformen hergestellt werden. Der Vorformling wird auf die optimale Strecktemperatur gebracht und durch Einwirkung einer von innen wirkenden mechanischen Kraft in Längsrichtung verstreckt. Durch gleichzeitiges Aufblasen wird er zusätzlich in Umfangsrichtung verstreckt. Durch die biaxiale Verstreckung werden Schlagzähigkeit, Kältefestigkeit, Steifigkeit und Gasundurchlässigkeit verbessert. Die Vorformlinge können ein- oder zweistufig verstreckt werden. Mit diesem Verfahren lassen sich geringe Flaschengewichte und verbesserte mechanische Eigenschaften im Vergleich zum Extrusion-Blasverfahren erzielen.

Streckblasformmaschinen für die Verarbeitung von PVC arbeiten nach dem Ein- oder Zweistufenverfahren. In den Einstufenmaschinen laufen die Vorgänge der PVC-Vorformlingsherstellung, des Verstreckens und des Aufblasens nacheinander in einer Maschine ab. In solchen Anlagen sind Extruder und Blasformanlage oder Spritzgussmaschine und Blasformanlage kombiniert. Beim Zweistufenprozess wird zunächst ein PVC-Vorformling hergestellt, dessen Herstellung oft zeitlich und räumlich vom Verstrecken und Aufblasen getrennt ist. Abbildung 5 zeigt das Prinzip des Streckblasens. Bei einstufigen Extrusions-Streckblasanlagen übernimmt zunächst die Schließeinheit I mit einer Vorblasform den warmen, plastischen PVC-Schlauchabschnitt. Dann wird der Vorformling aufgeblasen, thermisch konditioniert, der Halsbereich kalibriert und der Abfall entfernt. Nach dem Öffnen der Vorblasform fährt das Schließsystem I wieder unter das Extrusionswerkzeug. Die an Kalibrierdornen hängenden PVC-Vorformlinge werden von der im Schließsystem II installierten Fertigblasform übernommen und in die Streck- und Blasstation überführt. Im Schließsystem I wird zeitlich parallel bereits ein neuer Schlauchabschnitt aufgenommen. Die PVC-Vorformlinge im Schließsystem II werden mit Reckstempel und Blasluft biaxial verstreckt und abgekühlt. Nach dem Öffnen der Fertigblasform schwenkt das Schließsystem II wieder zur Übernahme neuer Vorformlinge in die Kalibrierstation. Die von Blas- und Reckdornen gehaltenen PVC-Hohlkörper werden von Übernahmeelementen aus der Maschine gefördert. Beim zweistufigen Extrusions-Streckblasformen werden extrudierte PVC-Rohre in einer Zwischenstufe unter Bodennahtverschweißung und Halsausbildung zu reagenzglasförmigen Vorformlingen umgeformt. Diese Vorformlinge werden aufgeheizt und werden dann mit einem Reckstempel biaxial verstreckt und abgekühlt.



- 1: Übernahme des plastischen Schlauches (Schließeinheit I)
- 2: Vorblasen des Schlauches (Schließeinheit I)
- 3: erneute Übernahme eines plastischen Schlauches (Schließeinheit I) und Übergabe des Vorformlings an die Fertigblasform (Schließeinheit II)
- 4: Vorblasen (Schließeinheit I) und biaxiales Verstrecken des Vorformlings (Schließeinheit II)
- 5: wie 3
- 6: Hohlkörper

Abbildung 5: Streckblasprozess [6]

Zweistufige Spritz-Streckblasanlagen arbeiten ebenso, allerdings ausgehend von einem spritzgegossenen Vorformling [6].

3.5 Pastenverarbeitung

PVC-Pasten, auch Plastisole genannt, sind Dispersionen von feinteiligen PVC-Partikeln in flüssigen Weichmachern. Diese Plastisole nehmen im Bereich der Verarbeitung von PVC eine Sonderstellung ein. Ihre Formgebung erfolgt in flüssiger bzw. pastöser Phase und nicht im thermoplastischen Zustand wie bei anderen Verarbeitungsverfahren (Extrusion, Kalandrieren, Spritzgießen). Die Verfestigung, das sogenannte Gelieren, erfolgt erst im Anschluss an die Formgebung durch eine Wärmebehandlung bei 120-200°C. Die Paste kann durch Rakeln, Drucken, Tauchen und Gießen verarbeitet werden. Die Hauptanwendungen sind kontinuierliche Beschichtungsverfahren, wie sie bei der Herstellung von Fußbodenbelägen, Kunstledern und Gewebebeschichtungen angewendet werden. Bei der Verarbeitung kommt der Rheologie eine wichtige Bedeutung zu. PVC-Pasten weisen meistens ein nicht-newtonsches Fließverhalten auf, d. h. die Viskosität ist von der Schwergeschwindigkeit und –dauer abhängig. Einer der Einflussparameter ist dabei die Teilchenverteilung im System. So kann z. B. durch den Einsatz zwickelfüllender kleiner Partikel die Viskosität einer Paste mit gleichgroßen Partikeln reduziert werden. Durch die Verwendung von Füller-Polymeren (Extender-/Blend-PVC) kann die Viskosität bei gleich bleibendem Weichmacheranteil deutlich reduziert werden. Durch Suspensions-Polymerisation erzeugte PVC-Typen haben eine Teilchengröße von 20-35 µm und absorbieren durch ihre runde Korngeometrie nur wenig Weichmacher, so dass sie gut für Plastisole geeignet sind [3].

3.5.1 Streichverarbeitung

Bei der Streichverarbeitung wird über ein Rakelsystem eine dünne Plastisolschicht auf eine kontinuierliche unter dem Rakelsystem durchgezogene Bahn aufgetragen. So werden Fußbodenbeläge, Tischdecken oder andere beschichtete Stoffe hergestellt [3].

3.5.2 Gießen

Für das Gießverfahren werden niedrigviskose Pasten verwendet. Das älteste Gießverfahren ist das Schalengussverfahren (Slush Moulding). Mit diesem Verfahren werden beispielsweise Häute für PKW-Instrumententafeln hergestellt. Je nach benötigter Wanddicke wird eine Form auf 120°C oder mehr vorgewärmt und mit Paste vollgegossen. Über die Verweilzeit in der Form lässt sich die Wanddicke zusätzlich einstellen. Die flüssige Paste wird aus der Form ausgegossen und die Form mit der an den Innenwänden haftenden PVC-Plastisolschicht für mehrere Minuten in einen Gelierofen mit ca. 190 bis 200°C gegeben. Dann wird auf 60°C abgekühlt und entformt. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens stellt das Rotationsformen dar [6].

Rotationsformen

Beim Rotationsformen wird das Plastisol in eine geöffnete Hohlform dosiert, die anschließend verschlossen, auf die Geliertemperatur erhitzt, und wieder abgekühlt und wieder geöffnet wird. Die relative weiche Materialbeschaffenheit erlaubt auch die Entformung starker Hinterschnitte. Produkte dieses Verfahrens können Bälle, Puppen oder große Dämpfungselemente sein [3].

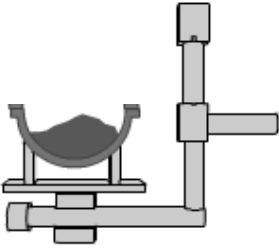
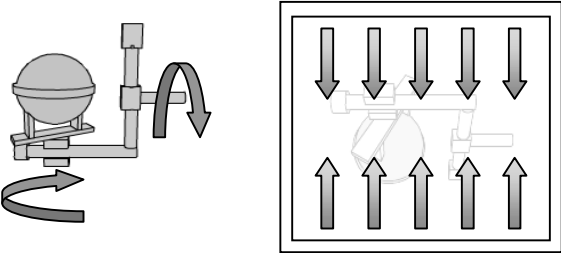
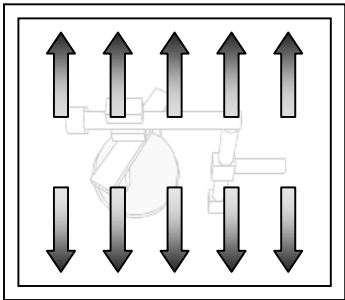
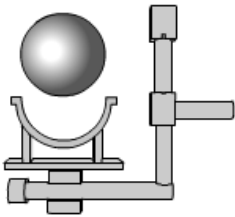
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Schritt 1</p>	<p>Im ersten Schritt wird das Werkzeug befüllt, indem man eine definierte Menge eines pulverförmigen oder flüssigen Rohstoffs in das offene Werkzeug gibt. Teilweise befindet sich im Werkzeug eine separate Kammer, die erst zu einem späteren Zeitpunkt geöffnet wird und den Rohstoff eindostiert. Das Werkzeug befindet sich auf einem Formenträger (Arm) der Verarbeitungsmaschine. Abschließend wird das Werkzeug geschlossen.</p>	<p>Befüllstation: Befüllen der geöffneten Form</p> 
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Schritt 2</p>	<p>Im zweiten Schritt versetzt man das Werkzeug in eine biaxiale Rotation, um eine vollständige Verteilung des Materials zu gewährleisten. Das Werkzeug wird in die Heizkammer eingefahren und das Material allmählich an der heißen Werkzeugwand aufgeschmolzen.</p>	<p>Start Rotation Heizstation</p> 
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Schritt 3</p>	<p>Sobald die vollständige, gleichmäßige Verteilung des Materials abgeschlossen ist, fährt das Werkzeug in eine Kühlstation. Die Rotation wird beibehalten, um ein Abfließen des Materials von der Werkzeugwand zu verhindern. Mit Kaltluft, Wasserdampf oder durch direktes Eintauchen in ein Wasserbad wird das Werkzeug abgekühlt.</p>	<p>Kühlstation</p> 
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Schritt 4</p>	<p>Nach ausreichender Kühlung fährt die Form in die Entformungs- und Beladestation. Hier wird das Werkstück entnommen. Anschließend steht das Werkzeug für eine Wiederbefüllung zur Verfügung.</p>	<p>Entformung</p> 

Abbildung 6: Prinzip der Verarbeitung durch Rotationsformen [9]

Anwendungsbeispiele Ballherstellung und Herstellung von Puppenteilen

Ein qualitativ hochwertiger Ball wird beispielsweise aus PVC-P-Plastisol (PVC-Pulver mit 50 % Weichmacheranteil und Modifikatoren) gefertigt. Mit PVC-P sind die balltypischen Eigenschaften wie z.B. das Springen oder geradliniges Flugverhalten sehr gut zu erfüllen. Wesentlicher Einflussfaktor zum Erreichen dieses Zieles ist eine gleichbleibende Werkstoffqualität ohne Blaseneinschlüsse und eine homogene Wanddickenverteilung.

Rotationsprozess zur Ballherstellung

Zur Herstellung eines normal großen Spielballes werden Ballrohlinge mit einem Durchmesser von ca. 90 bis 110 mm, entsprechend der Werkzeuggröße hergestellt. Die Form wird durch zwei dicht schließende Halbschalen ausgebildet (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Werkzeug zur Herstellung des Ballrohlings [9]

Diese Halbschalen sind dünnwandig aus Aluminium gefertigt. Zum Erzielen einer sehr guten Oberflächenqualität ist die konturenbildende Innenseite poliert und vernickelt.

Zur effektiven Fertigung werden in einem Rotationsprozess bis zu ca. 150 dieser Werkzeuge in zwei Reihen, d.h. auf zwei Kränzen nebeneinander und übereinander befestigt bzw. in einem Zyklus gefertigt.

Phase 1: Die noch warmen Ballrohlinge werden vom vorhergehenden Zyklus entnommen und anschließend das Plastisol (Mischung aus ca. 50% PVC und ca. 50% Weichmacher) über eine Düse in die einzelnen Formen dosiert. Die Kränze mit den Werkzeughälften werden geschlossen und somit die Werkzeugober- und -unterteile dichtschließend aufeinander gedrückt. Der Rotationsprozess wird gestartet und der Werkzeugträger zum Aufheizen in die nächste Station gefahren.

Phase 2: Der Rotationskranz wird so geschwenkt, dass das Plastisol die Werkzeugtrennebene überfließt. Das Werkzeug wird auf ca. 150°C temperiert und rotiert ca. 6 bis 9 min., so dass ein Quellen und Angelieren des Plastisols erfolgt.

Phase 3: In der nächsten Station wird die Rotationsrichtung verändert, dass auch die anderen Bereiche vom Plastisol an den „Polen“ der Kugel überflossen werden. Durch Temperaturerhöhung auf ca. 220°C wird das Ausgelieren beschleunigt und abgeschlossen.

Phase 4: Durch Anblasen von Luft werden die Werkzeuge auf ca. 40°C abgekühlt. Nach Schwenken in Phase 1 werden die Bälle entnommen und ein neuer Zyklus startet. Die noch warmen Bälle werden auf Endgröße aufgeblasen und zum Bedrucken weitergeleitet. Nach dem Bedrucken wird für den raumsparenden Transport die Luft aus den Bällen evakuiert.

Die Technologie zur Herstellung von Puppenköpfen und -körpern (Torso, Arme und Beine) unterscheidet sich von der Ballherstellung. Bei dem Material handelt es sich ebenfalls um PVC-P-Plastisol mit 50 % Weichmacheranteil.

Anforderungen an die Verarbeitung sind insbesondere eine vollständige Ausformung ohne größere lokale Materialanhäufung und ohne Lufteinschlüsse, homogene Materialqualität und ein gutes Entformen nach dem Rotationsprozess. Da beim Entformen oft größere Hinterschneidungen zu überwinden sind (z. B. im Augenbereich), muss bei höheren Temperaturen entformt werden, da so das Material weicher, flexibel und besser entformbar ist. Der Herstellungsprozess durchläuft im Wesentlichen die gleichen Stufen wie bei der Ballherstellung [9].

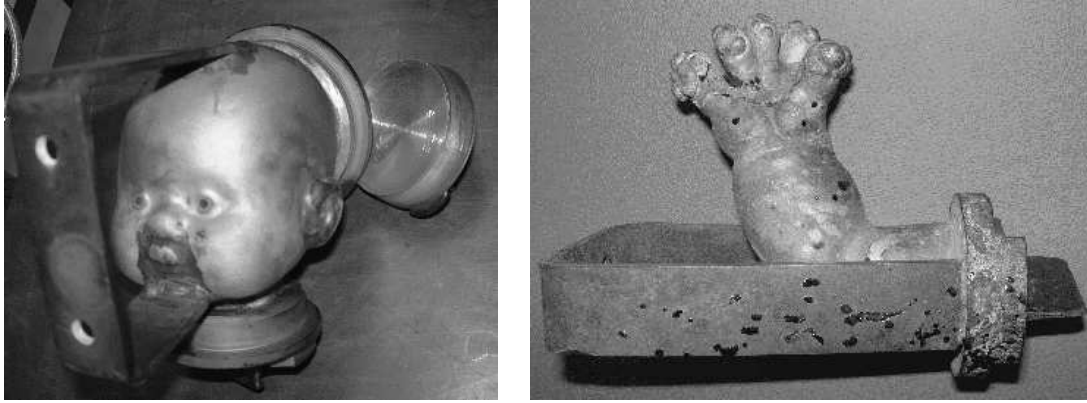


Abbildung 8: Werkzeug zur Herstellung Puppenkopfes (links) und –armes [9]

3.5.3 Sprühauftrag

Das zähflüssige Plastisol lässt sich auch im Sprühverfahren verarbeiten. Anwendungsgebiet ist beispielsweise der PVC-Unterbodenschutz für PKW [3]. Dazu wird das PVC-Plastisol mit hohen Drücken über Spritzpistolen verarbeitet [6].

3.5.4 Tauchverfahren

Das Tauchverfahren wird überwiegend für die Beschichtung eingesetzt. Hierbei wird der zu beschichtende Artikel kurz in das Plastisol getaucht und anschließend ausgeliert [3].

Typische Produkte dieses Verfahrens sind z. B. Handschuhe. Beim Tauchverfahren wird zwischen Warm- und Kalttauchen unterschieden. Beim Warmtauchen werden die zu beschichtenden Formkörper auf ca. 200 °C erwärmt und dann in Plastisol eingetaucht. Dabei bildet sich eine Pastenhaut auf dem Formteil. Das Formteil wird langsam aus der Paste gezogen und das Plastisol ausgeliert. Die Dicke der Beschichtungshaut ist von Tauchzeit, Pastenviskosität, Vorheiztemperatur und Wärmekapazität des zu beschichtenden Formteils abhängig.

Beim Kalttauchverfahren wird der zu umhüllende Gegenstand ohne Vorwärmung in die Paste getaucht und nach dem Herausnehmen ausgeliert. So werden Gegenstände mit geringer Wärmekapazität (z. B. Handschuhe mit Gewebe, Drahtgitter und Gewebe) mit PVC-Plastisol beschichtet. Die Dicke der Beschichtung wird allein von der Pastenviskosität bestimmt. Tauch- und Geliervorgang können bis zum Erreichen der gewünschten Schichtdicke wiederholt werden [6].

3.6 Schmelzwalzenverfahren

Das Schmelzwalzenverfahren ist eine Verarbeitungstechnologie, die zwischen Kalanderverarbeitung und Pastenstreichverfahren anzusiedeln ist. Auf Schmelzwalzenanlagen können trägerlose PVC-Folien und auch PVC-Beschichtungen hergestellt werden.

Die Verarbeitungstechnologie des Schmelzwalzenverfahrens ist in erster Linie ein Beschichtungsverfahren mit Feststoffen wie Pulvermischungen oder Granulaten aus Stabilisatoren. Über Speiseextruder, Trichter oder Heizmischer wird das PVC auf die heißen Walzen gegeben (siehe Abbildung 9) und in eine Schmelze überführt. Im Walzenspalt wird mit dieser Schmelze je nach Walzendruck ein definierter Film auf das zu beschichtende Substrat laminiert.

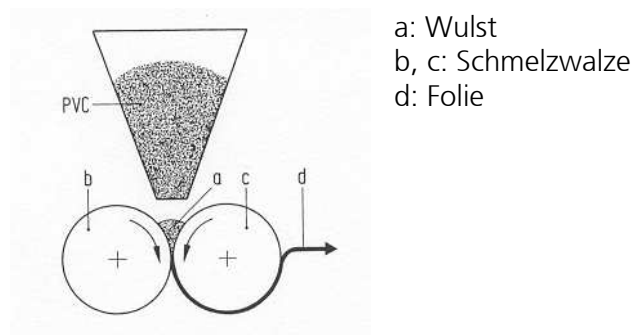


Abbildung 9: Beschickung und Filmbildung beim Schmelzwalzenverfahren [6]

Beschichtet werden können alle wickelbaren Trägermaterialien wie z. B. geschlossene und offene Textilien, Papiere aller Art und wickelbarer Karton. Mit dieser Beschichtungsmethode können durch den Walzendruck hohe Beschichtungsdichten erreicht werden, die der Beschichtung eine hohe Abriebfestigkeit geben. Ausgehend von Pulvermischungen oder Granulaten können mit der Schmelzwalze auch Folien hergestellt werden. Die Folien sind qualitativ den Kalandervollfolien unterlegen, da das Schmelzwalzenverfahren nur mit zwei oder drei Walzen arbeitet. Bei den Dreiwalzenanlagen wird zwischen L- und I-Form (vgl. Abbildung 4) unterschieden. Beim Zweiwalzenverfahren wird den zwei beheizten Schmelzwalzen vorplastifiziertes bzw. nicht plastifiziertes PVC zugeführt. Zwischen den beiden beheizten Walzen bildet sich ein Wulst aus aufgeschmolzenem Compound. Diesem wird kontinuierlich Material entzogen und auf einer Festwalze zu einem Film verformt. Die Filmdicke wird durch den Anstelldruck bzw. den Walzenabstand bestimmt. Die feststehende Walze läuft mit einer um 10% höheren Umfangsgeschwindigkeit als die bewegliche Walze und hat eine 5°C höhere Temperatur. Eine von einer Abwickelstation über eine Vorheizwalze geführte Trägerbahn wird durch eine gummierte, kalte Abnahmewalze gegen die feststehende Schmelzwalze gepresst, so dass der darauf haftende PVC-Film eng mit der zu beschichtenden Trägerbahn verbunden wird. Diesem Verbund kann durch eine auswechselbare Glätt- oder Prägwalze ein beliebiges Oberflächenfinish verliehen werden. Über eine Kühlwalze und den Kantenschnitt wird die beschichtete Bahn der Aufwicklung zugeführt. Bei der Herstellung trägerloser Folien wird von der feststehenden Walze der Film über einen Folienstab (PTFE-Walze) dem Spalt zwischen der gummierten Abnahmewalze und der nachgeschalteten Prägwalze zugeführt.

Beim Dreiwalzenverfahren geschieht die Plastifizierung und Verformung des PVC auf zwei Knets bzw. in zwei Walzenspalten. Bei Beschichtungen nimmt das PVC hier bis auf den zweiten Walzenspalt den gleichen Verlauf wie bei der Zweiwalzenanlage. Vorteilhaft ist die Dreiwalzenanlage vor allem bei der Herstellung trägerloser Folien, da bei zwei Walzenspalten eine homogenere Schichtdicke über die Beschichtungsbreite erreicht wird.

Für das Schmelzwalzenverfahren ist die Beschickung des Walzenspalts mit bereits plastifiziertem, homogenisiertem PVC optimal. Üblicherweise werden Planetwalzenextruder als

Vorplastifizierungseinheit für Schmelzwalzanlagen eingesetzt. Schmelzwalzanlagen sind gut geeignet, um Beschichtungen und trägerlose Folien herzustellen. Bei Walzentemperaturen um 250 °C können PVC-Compounds in ihren Fließbereich überführt werden, ohne dass das Material durch die dabei auftretenden thermomechanischen Belastungen geschädigt wird. Dichte Polyamid- und Polyestergerewebe benötigen bei der Beschichtung mit PVC eine Haftvermittlung. Dazu werden Ein- oder Zweikomponenten-Isocyanatsysteme in Grundstrichpasten eingearbeitet, die über Streichanlagen aufgerakelt und im Gelierkanal angeliert werden. Der Haftvermittler kann auch in einem Arbeitsgang kurz vor dem Schmelzwalzenverfahren aufgebracht werden. Dazu wird die haftvermittlerhaltige Paste ebenfalls direkt aufgerakelt und bis zur Schmelzwalzenbeschichtung die Haftreaktion zur Faser durch Strahlungs- oder Kontaktwärme eingeleitet. Mit diesem Verfahren erhält man Verbundwerkstoffe mit hohen Haftwerten und sehr guten Weiterreißfestigkeiten mit einer dichten und porenfreien Oberfläche.

Beschichtete Produkte des Schmelzwalzenverfahren sind Bekleidungs-, Täschner-, Schuh-, Auto- und Polsterkunstleder, Tapeten, Markisen, Tischdecken, Bodenbeläge, Teppichrückseiten und Kofferraumauskleidungen. Mit dem Schmelzwalzenverfahren hergestellte PVC-P-Folien werden zu Tischdecken, Duschvorhängen, Bucheinbänden, Klarsichthüllen, Möbelfolien, Kaschierfolien für Bodenbeläge sowie für Auskleidungen von Kanälen und Bewässerungsgräben konfektioniert [6].

4 Weiterverarbeitung von PVC-Halbzeugen

4.1 Verstrecken

Verstreckt werden extrudierte PVC-Schlauchfolien, kalandrierte PVC-Flachfolien oder Platten. Die verstreckten Folien können beispielsweise als Schrumpffolien in der Verpackungsindustrie eingesetzt werden. Es wird zwischen der vorwiegend monoaxialen Reckung in einer Walzen- oder Rollenstrecke und der biaxialen Reckung durch Längsreckung in der Walzenstrecke und Querreckung durch Kluppen oder simultan durch Kluppketten in der Längs- oder Querrichtung unterschieden. Solche Reckstrecken sind normalerweise einem Kalandrierer oder Extruder nachgeschaltet. PVC-Folien haben in der Regel eine Vorfoliendicke von ca. 200 bis 250 µm. Verfahrensparameter für die Reckung in einer Rollstrecke liegen üblicherweise bei

- Recktemperatur 100-110°C
- Reckverhältnis: 1:2,5 bis 1:3
- Reckgeschwindigkeit bis 130 m/min.

E-PVC kann bis auf Endfoliendicken von 0,035 mm, S-PVC bis auf 0,025 mm Endfoliendicke gereckt werden [6].

4.2 Biegen

Umformverfahren werden häufig bei der Weiterverarbeitung von PVC-Rohren für die Trink-, Abwasser- und Gasversorgung eingesetzt. Zu den häufigsten Anwendungsgebieten zählen das Herstellen von Rohrbögen und das Anmuffen von Rohren. Das Biegeumformen von Platten wird hauptsächlich in Form des Abkantens im chemischen Apparatebau und in der Klima-Lüftungstechnik angewendet. Automatisch arbeitende Anmuff-Anlagen sind meistens nach der Abtrennvorrichtung in Rohranlagen integriert. Die Erwärmung des Materials im Umformbereich erfolgt in der Regel in einer Infrarotkammer. Die Formung der Muffe wird mit einem expandierbaren Dorn durchgeführt. Wanddickenverringerungen, die während des Umformens auftreten, werden kompensiert, indem beim Extrudieren die Abzugslänge entsprechend der Muffenlänge diskontinuierlich reduziert wird [6].

4.3 Thermoformen

Unter Thermoformen ist der Prozess der Formveränderung von einem zweidimensionalen Halbzeug zu einem dreidimensionalen Formteil zu verstehen. Bei der Thermoumformung von Thermoplasten hat sich großtechnisch durchgesetzt, dass die Verformungsenergie in Form von Vakuum oder Druckluft eingebracht wird. Sonderverfahren benutzen auch Patrizie-Matrize-Presswerkzeuge. Beim Thermoformen handelt es sich um einen reinen Dehnvorgang, der in einem kontinuierlichen Ablauf durchgeführt wird. Der zu formende Zuschnitt ist am Rand fest eingespannt. Die Flächenvergrößerung die aufgrund der Umformung auftritt, hat somit eine Dickenabnahme zur Folge.

Das Thermoformen von Thermoplasten gliedert sich in die Verfahrensschritte:

- Vorbehandlung
- Aufheizvorgang
- Umstell- und Formvorgang
- Abkühlvorgang.

Zur Vorbehandlung von PVC ist in der Regel keine Vortrocknung des Halbzeuges notwendig, jedoch ist für eine gute Oberfläche des Fertigteils eine staub- und verunreinigungsfreie Oberfläche des Halbfabrikates wichtig. Da extrudierte Platten und Folien bedingt durch ihre Herstellung eine Längsorientierung besitzen und dies beim Formen zu Faltenbildung führen kann, können die Halbzeuge vorher biaxial gestreckt und durch Tempern wieder auf ihre

ursprüngliche Größe gebracht werden. Bei extrudiertem schlagfestem PVC macht sich die Längsorientierung durch das Brechen an scharfen Kanten bemerkbar. Durch Tempern der Halbzeuge kann dies verhindert werden. Teilweise können die Halbzeuge schon vorbehandelt bezogen werden.

Für die Erwärmung der Halbzeuge von der Ausgangstemperatur auf die Umformungstemperatur werden Kontakterwärmung, Konvektionserwärmung oder Infrarotstrahlungserwärmung eingesetzt.

Alle Verfahren können ein- und zweiseitig angewendet werden, die zweiseitige Arbeitsweise hat sich bis auf die Verarbeitung sehr dünner Folien durchgesetzt. Eine generelle Angabe zur Grenztemperatur ist nicht möglich, da diese stark vom Material und der tolerierbaren Qualität des späteren Formteils abhängt. Sie liegt jedoch unter der Temperatur, bei der irreversible Änderungen an der Oberfläche auftreten. Eine allgemeingültige Angabe der Mindestumformungstemperatur ist ebenfalls nicht möglich, da diese stark von der zu erzielenden Formveränderung und der Umformgeschwindigkeit abhängt.

Bei der Kontakterwärmung erfolgt die Erwärmung der Halbzeuge durch Wärmeleitung. Die Oberflächentemperatur bleibt während der Erwärmungszeit konstant. Die Plattentemperaturen betragen bei diesem Verfahren etwa 200 °C. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für die Erwärmung dünnwandiger Folien für Blisterverpackungen verwendet.

Die Konvektionserwärmung ist formatunabhängig. Die Oberflächentemperatur steigt im Laufe der Erwärmungszeit an. Die langen Heizzeiten bedingt durch die schlechte Wärmeleiteigenschaften von PVC und die geringen Wärmeübergangskoeffizienten ergeben geringe Temperaturunterschiede über den Halbzeugquerschnitt. Eingesetzt wird dieses Verfahren bevorzugt bei der Verarbeitung von transparenten oder dicken PVC-Platten.

Die Infrarot-Strahlungserwärmung ist das heute beim Thermoformen am häufigsten angewendete Verfahren. Als Strahlersystem werden Keramik-, Quarz- und Halogenstrahler eingesetzt. Wie bei der Konvektionserwärmung nimmt bei der Infrarot-Strahlungserwärmung die Oberflächentemperatur des Halbzeuges mit der Zeit zu. Bei der Infrarot-Strahlungserwärmung gibt es ebenfalls ein- und beidseitige Methode.

Bei den industriellen Thermoformmaschinen können Ein- und Mehrstationenmaschinen unterschieden werden. Bei den Einstationenmaschinen erfolgen Erwärmung und Formung in einer Station. Die Zykluszeiten der einzelnen Prozessstufen Einlegen, Aufheizen, Ausfahren des Heizsystems, Vorformen, Ausformen, Kühlen und Entnahme des Bauteils addieren sich zur Gesamtzykluszeit. Bei Mehrstationenmaschinen bestimmt dagegen die längste Zykluszeit einer einzelnen Prozessstufe die Zykluszeit [6].

4.4 Spangebendes Formen

Zu den spangebenden Formverfahren zählen Sägen, Drehen, Hobeln, Stoßen, Fräsen, Feilen, Schleifen und Polieren. Bei der Bearbeitung von PVC mit diesen Verfahren ist zu beachten, dass der Werkstoff schon bei geringen Temperaturen erweicht (PVC-U bereits ab 80 °C). Um ein Verschmieren der Schnittfläche zu vermeiden, sollten die Temperaturen an der Schnittfläche nicht mehr als 60 °C betragen. Sofern keine besonderen Angaben für PVC vorliegen, gelten die Schnittbedingungen und Schneideformen für Thermoplaste.

PVC-U lässt sich mit den üblichen Bohrern für metallische Werkstoffe bohren. Hobeln und Stoßen werden zur Bearbeitung von PVC nur selten eingesetzt, da die für die Metallverarbeitung eingesetzten Maschinen die für PVC günstigen Schnittgeschwindigkeiten nicht zulassen. Aufgrund seiner Temperaturempfindlichkeit kann PVC nur bei entsprechender Kühlung geschliffen werden [6].

4.5 Verbindungen

4.5.1 Schweißen

PVC lässt sich wegen seines Dipolmomentes der Kohlenstoff-Chlor-Bindung über Hochfrequenztechnik verarbeiten, daher können auch PVC-Produkte durch Schweißverfahren fest und dauerhaft verbunden werden. Bei den Verfahren werden physikalische Erwärmungsmethoden wie z. B. Erwärmung durch Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung und Reibung, die Erwärmung im Hochfrequenzfeld und durch Ultraschall oder Induktion ausgenutzt. Beim Induktionsschweißen müssen in den Kunststoff Metallringe oder metallische Zusatzstoffe eingebracht werden.

Formteile aus PVC werden in der Regel mit Heizelement-, Reib- und Ultraschallverfahren geschweißt. Bei Halbzeugen kommt das Heizelement-, Reib-, Warmgas- und das Hochfrequenz (HF)-Schweißen u. a. bei Platten zur Anwendung. Bei Folien haben sich das Wärmekontakt-, Wärmeimpuls-, Hochfrequenz-, Heizkeil- und vereinzelt das Warmgasschweißen bewährt. Die Temperaturgrenzen für den Schweißprozess sind nach unten durch die Fließfähigkeit der PVC-Schmelze und nach oben durch die Materialschädigung begrenzt. Neben der Mindestschweißtemperatur haben bei allen Schweißverfahren die Dauer der Temperatureinwirkung und der aufgebrachte Fügedruck einen großen Einfluss auf die erzielbare Nahtfestigkeit. Die drei Größen sind voneinander abhängig und können daher nicht in beliebiger Weise verändert werden. Bei den Schweißverfahren für Formteile oder Halbzeuge (z. B. Heizelementschweißen, Reib- und Ultraschallschweißen) spielt der Druck eine große Rolle, da durch den Schweißdruck ein ausgeprägter Schmelzefluss auftritt, der sich in starkem Maße auf die Nahtqualität auswirkt. Bei den Folienschweißverfahren (Wärmekontakt- und Wärmeimpulsmethode) erfolgen Erwärme- und Fügevorgang i. d. R. gleichzeitig. Die Fließvorgänge sind daher erheblich geringer und wirken sich nicht so gravierend auf die Schweißnahtqualität aus. Für die Nahtqualität sind die Wärmeübertragungsvorgänge von ausschlaggebender Bedeutung [6].

Tabelle 2: Schweißverfahren für PVC [6]

Verfahren	Kennzeichnende Verfahrensweise	Anwendung	
Warmgasschweißen	Die zu verbindenden Flächen werden mit warmen Gasen erwärmt und mit oder ohne Zusatzwerkstoff unter Druck verschweißt.		
	Fächelschweißen	Die Schweißstelle wird vom Warmgasstrom umfächelt.	Halbzeug
	Schnellschweißen	Der Warmgasstrom wird direkt auf die Schweißstelle gerichtet. Ein Teilstrom wärmt den Zusatzwerkstoff vor.	Halbzeug, z.T. PVC-beschichtetes Gewebe
Heizelementschweißen	Die Verbindungsflächen werden mit Heizelementen auf Schweißtemperatur erwärmt und unter Druck verschweißt.		
	direkte Heizelementverfahren	Die Wärme wird den Verbindungsflächen durch direkten Kontakt mit dem Heizelement zugeführt.	
	Stumpfschweißen	Erwärmung durch Heizplatte, die die Kontur der Fügeteile besitzt.	Halbzeug, Formteile
	Schwenkbiegeschweißen	Erwärmung mit Heizkeil.	Halbzeug
	Nutschweißen	Getrennte Erwärmung der Fügeteile mit anschließendem Schweißen unter Druck.	Halbzeug
	Heizkeilschweißen	Die Verbindungsflächen werden kontinuierlich am Heizkeil vorbeigezogen und anschließend unter Druck verschweißt.	Folien, selten plattenförmiges Halbzeug
	indirektes Heizelementschweißen	Die unter Druck stehenden Verbindungsflächen werden vom Heizelement von außen durch den Kunststoff hindurch erwärmt.	
	Wärmekontaktschweißen	Dauerbeheizte Metallbänder werden durch Stromimpulse erwärmt.	Folien
	Wärmeimpulsschweißen	Die Erwärmung erfolgt ein- oder beidseitig.	Folien
Reibschweißen	Die Verbindungsflächen werden durch Reibung erwärmt und unter Druck verschweißt.	Halbzeug und Formteile	
Hochfrequenzschweißen	Erwärmung durch hochfrequentes, elektrisches Wechselfeld zwischen zwei sich gegenüberstehenden Leitern. Verschweißen unter Druck.	Folien, Halbzeug (Platten)	

Verfahren	Kennzeichnende Verfahrensweise	Anwendung	
Ultraschallschweißen (US)	Die Verbindungsflächen werden durch mechanische Schwingungen im Ultraschallbereich erwärmt und unter Druck verschweißt.		
	direktes US-Schweißen	Schallquelle liegt nahe der Schweißstelle (< 6mm)	Formteile, Folien
	indirektes US-Schweißen	Schallquelle liegt fern der Schweißstelle.	Formteile
Lichtstrahlschweißen	Die Verbindungsflächen werden durch Strahlung erwärmt.		
	direktes Lichtstrahlschweißen	Direkte Bestrahlung der Verbindungsflächen.	Folien
	indirektes Lichtstrahlschweißen	Die Wärme muss durch das PVC zur Fügefläche transportiert werden.	Folien
Induktionsschweißen	Induktive Erwärmung eines Stahlringes oder Ferromagnetischer Partikel in einem PVC-Ring.	Formteile	

4.5.2 Kleben

Neben dem Schweißen gehört das Kleben zu den wichtigsten Verfahren der Verbindungsherstellung. PVC ist aufgrund seiner Polarität gut klebbar. Die verwendeten Klebstoffsysteme und Klebetechniken richten sich nach dem PVC-Typ. PVC-U und PVC-P müssen beim Kleben als unterschiedliche Werkstoffe betrachtet werden [6].

Für das Verkleben von PVC eignet sich die Diffusionsklebung besonders gut. Für diese Art des Klebens dienen Lösungen von nachchloriertem PVC in Kohlenwasserstoffen (PC-Klebstoff) oder von PVC-Copolymerisaten in Tetrahydrofuran (THF-Klebstoffe). Mit THF-Klebstoffen können Fügeabstände von 0,6 bis 1,2 mm (je nach Anforderungen an die Dichtheit) überbrückt werden. Die Klebeflächen werden mit chlorierten Kohlenwasserstoffen vorbehandelt. Eine Vorbehandlung der Fügeflächen, beispielsweise bei Fensterprofilen, kann durch eine Koronabehandlung erfolgen. Bei der Koronabehandlung werden die Verarbeitungshilfsmittel entfernt und die Oberfläche modifiziert. Neben Fensterrahmen eignen sich auch PVC-Rohre mit großem Durchmesser für diese Vorbehandlung. Für die Behandlung von Profilen mit gekrümmter Oberfläche sind Formelektroden erforderlich [3]. Bei neueren Verfahren werden die Fensterprofile zunächst mit einem alkalischen Reiniger von Verunreinigungen wie Wachsen und Gleitmitteln gereinigt, dann wird eine Flammenvorbehandlung durchgeführt und schließlich mit einem lösungsmittelfreien Klebstoff (Polyurethan-Hotmelt) Kaschierungsfolien aufgeklebt [10].

PVC-P lässt wegen der Anteile an unterschiedlichen Weichmachern keine einheitliche Behandlung zu. PVC-P mit Weichmacher-Anteilen bis zu 40% ist gut klebbar. Adhäsionsklebung ist mit Klebstoffen auf der Basis von PUR, Nitrilkautschuk und Polychlorbutadien möglich. Das Diffusionskleben entspricht dem bei PVC-U. Die Oberflächen werden dazu mit Leichtbenzin oder Wasser vorbehandelt. Bei PVC-U ist Adhäsionsklebung mit Zweikomponenten-Reaktions-Klebstoffen auf der Basis von EP, PUR und PMMA möglich [3].

4.5.3 Schrauben und Schraubverbindungen

Beim technischen Einsatz von PVC gilt es häufig, Bauelemente untereinander oder mit Metallteilen zu verbinden. Die Verschraubungsmöglichkeiten lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Verbindungen mit Schraube und Mutter
- Metallschrauben im Muttergewinde aus Kunststoff
- Schraubverbindungen mit metallischen Gewindeeinsätzen [6].

4.5.4 Nieten

PVC kann mit Nieten aus Kunststoff oder aus metallischen Werkstoffen vernietet werden. Kunststoffnieten bieten den Vorteil, dass sie ebenso korrosionsbeständig sind wie das zu vernietende Bauteil. Kunststoffnieten neigen jedoch unter Last zum Kriechen und die Belastbarkeit ist zudem stark temperaturabhängig. Diese Nachteile können durch den Einsatz von Metallnieten umgangen werden. Metallnieten können jedoch Schwierigkeiten bei der Schließkopfbildung bereiten. Die entstehenden Lochlaibungsdrücke müssen vom Kunststoffteil noch aufgenommen werden können. Deshalb werden Nieten aus leicht verformbaren metallischen Werkstoffen bevorzugt. Geeignet ist beispielsweise eine zähe Aluminiumlegierung. Durch die Nietform wie Hohlنieten oder Rohrnieten kann dafür gesorgt werden, dass nur geringe Lochlaibungsdrücke auftreten.

Spritzgegossene Teile mit angeformtem Nietschaft oder Nietloch ermöglichen fertigungstechnisch die günstigste Anwendung des Kunststoffnietes. Als Nietverfahren werden bei PVC das Warmstauchen und das Nieten mit Ultraschall eingesetzt. Beim Warmstauchen wird der Nietkopf mit einem beheizten Metallstempel geformt. Der ganze Schaft muss gut durchgewärmt sein, die Temperatur sollte dabei über 80°C liegen. Wenn der Schließkopf angestaucht ist, muss die Niederhaltekraft so lange aufrecht erhalten bleiben, bis der Kopf ausreichend abgekühlt ist. Beim Warmstauchen treten relativ lange Nietzeiten auf. Bevorzugt wird das Nieten mit Ultraschall genutzt. Beim Ultraschallnieten wird die mit einer Frequenz von

20 kHz schwingende Sonotrode so angekoppelt, dass an der Berührungsstelle der Sonotrode mit dem Nietschaftende phasenungleiche Schwingungen aufeinander treffen. Dies kann durch niedrige Auflagedrücke erreicht werden. An der punktförmigen Berührungsfläche wird ein Großteil der Schwingungsenergie in Wärme umgewandelt. Der Nietschaft beginnt von dieser Zone aus aufzuschmelzen. Mit geringem Anlagedruck der Sonotrode wird dieser Schmelzvorgang so lange aufrecht erhalten, bis der Schließkopf geformt ist. Dann wird die Energiezufuhr abgebrochen. Nach kurzem Niederhalten kann die Sonotrode wieder von der abgekühlten Nietverbindung entfernt werden [6].

4.5.5 Umbördeln

Das Umbördeln wird auch als eine Variante des Nietens bezeichnet. Es wird bei Bauteilen eingesetzt, die aus konstruktiven Gründen keine Nietzapfen erhalten können oder bei Teilen, bei denen die Nietzapfen zu groß werden würden. Zum Bördeln wird ein Hohlzapfen angespritzt, der dann mittels Ultraschall plastifiziert und durch die Formgebung des Werkzeugs (Sonotrode) gebogen wird. Das Umbördeln erfolgt bei kleinen Abwärtsgeschwindigkeiten der Sonotrode. Dadurch entsteht nur ein geringer Druck, so dass kaum Spannungen eingefroren werden. Es ist zu beachten, dass die Sonotrode nicht auf das zu fixierende Teil aufsetzt [6].

4.5.6 Weitere mechanische Fügeverfahren

Neben den bereits erwähnten mechanischen Fügeverfahren werden auch Nageln, Klammern, Nähen, Heften und Klemmen von PVC-Teilen angewandt. Die Bedeutung dieser Verfahren ist jedoch recht gering. Nageln und Klammern werden z. B. bei der Herstellung provisorischer Schutzisolierungen eingesetzt. Unverstärkte Folien sind dabei einer erhöhten Einreißgefahr ausgesetzt.

Das Nähen von PVC-P-Folie und beschichteten Geweben mit Nadel und Faden ist nur sinnvoll, wenn die Naht nicht dicht sein muss. Genäht wird in der Regel mit großen Stichen (Stichabstand 2 bis 5 mm). Zum Nähen kann auch Ultraschall eingesetzt werden [6].

4.5.7 Konstruktive Verbindungen

Schnappverbindungen

Schnappverbindungen bieten eine einfache, wirtschaftliche und schnelle Verbindungsmöglichkeit. Sie werden vor allem dann eingesetzt, wenn Teile einfach zu montieren oder zu demontieren sein sollen oder ein kompliziertes Teil aufgrund hoher Werkzeugkosten aus mehreren einfachen Teilen zusammengesetzt wird. Durch die Ausbildung des Hinterschnittes können die Verbindungen lösbar oder unlösbar gestaltet werden. Gas- und flüssigkeitsdichte Schnappverbindungen lassen sich mit Hilfe von Dichtungselementen realisieren. Für die Belastbarkeit einer Schnappverbindung ist der effektive Hinterschnitt maßgebend. Bei kurzfristigen Belastungen, wie z. B. Füge- oder Demontagevorgänge, sind bei PVC-U Dehnungen von 2-3 %, bei PVC-P Dehnungen von 10-12 % zulässig. Die tatsächlich genutzten Werte liegen meist darunter [6].

Steckverbindungen

Zur Bildung einer Steckverbindung wird das Ende eines Bauteils in das geometrisch größere Ende eines zweiten Bauteils eingeschoben oder über dessen verkleinertes Ende geschoben. Steckverbindungen können mit Bauteilpartnern aus PVC oder anderen Materialien realisiert werden. Falls eine Abdichtung erforderlich ist, können Dichtelemente in die Verbindung eingelegt werden. Da die Steckverbindung nicht längskraftschlüssig ist, müssen bei Einleitung einer Längslast Befestigungspunkte vorgesehen werden, um ein Auflösen der Steckverbindung zu verhindern. Eingesetzt werden Steckverbindungen z. B. bei der Verlegung von drucklosen Abwasserleitungen aus weichmacherfreien PVC-U Rohren [6].

Insert-Technologie

Mit Hilfe der Insert-Technologie können Metallteile direkt im Spritzgussprozess in ein Bauteil mit eingespritzt werden wie z. B. Steckstifte oder Muttern.

4.6 Metallisieren

Die Metallisierung kann durch Vakuum-Bedampfen und Galvanisieren erfolgen.

Bei den niedrigen Drücken, die für das Aufdampfen im Hochvakuum notwendig sind (ca. 10^{-4} mbar) stören Gase und Dämpfe in zu hoher Konzentration den Aufdampfvorgang. Deshalb bereiten weichmacherhaltige Kunststoffe und solche mit einem relativ hohen Anteil an niedermolekularen Ketten Schwierigkeiten. Ein Ausgasen führt zu verlängerten Pumpzeiten, beeinträchtigt so die Wirtschaftlichkeit oder macht das Bedampfen unmöglich. PVC-U und PVC-P sind mit anderen Kunststoffen nur bedingt für das Bedampfen einsetzbar. Wird PVC mit einer gasdichten Grundlackierung versiegelt, kann dies die Eignung für das Bedampfen verbessern. Weichmacherfreies PVC kann im Prinzip ebenso wie ABS-Copolymerisate galvanisiert werden. Dennoch hat sich die chemogalvanische Metallisierung von PVC in der Praxis nicht durchgesetzt [6].

4.7 Lackieren

Beim PVC werden häufig Lackierungen vorgenommen, um Produkte optisch aufzuwerten oder ihnen einen höheren funktionellen Gebrauchswert zu verleihen. Grundsätzlich lässt sich PVC mit allen üblichen Lackierverfahren problemlos veredeln. Es bereitet auch bei der Spannungsrissempfindlichkeit viel weniger Schwierigkeiten als Polystyrole oder Polyacrylate. Haftungsprobleme, wie sie bei Polyolefinen auftreten, die eine spezielle Vorbehandlung benötigen, sind bei PVC nicht bekannt. Allerdings kann bei PVC gelegentlich ein Nachkleben oder Ausbluten des Lackes vorkommen. Nachkleben wird bei PVC-U kaum beobachtet, denn es ist meistens auf das Einwandern von Weichmacheranteilen in den Lack zurückzuführen. Diese Migration kann zwei Ursachen haben: Entweder ist der Weichmacher selbst nicht migrationsbeständig - was häufig der Fall ist - oder es wurde ein ungeeignetes Lacklösemittel ausgewählt, das den Kunststoff zu stark anlöst und nur sehr langsam desorbiert. Ein Ausbluten tritt auf, wenn der Kunststoff mit nicht lösemittellechten Pigmenten eingefärbt ist. Dieser Fehler kann vermieden werden, indem ein anderes Lösemittel eingesetzt wird. Eine feine Abstimmung zwischen Kunststoff, Lacksystem und Lackierverfahren ist notwendig, um gute Lackierergebnisse zu erreichen. PVC-U wird meist mit Lacken auf Polyacrylat-, Polyurethan oder Epoxidbasis beschichtet. Kombinationslacke sind meist ebenso geeignet. Beim Lackieren von weichmacherhaltigem PVC werden aufgrund der Gefahr der Migration nur physikalisch trocknende Lacke auf Basis von PVC, VC-Copolymerisaten oder Polyacrylaten verwendet [6].

4.8 Bedrucken

Die für die Veredelung durch Bedruckung eingesetzten Verfahren und Druckfarben richten sich vorrangig nach dem PVC-Typ, d. h. vor allem nach dem Weichmacher-Anteil im PVC. Die am häufigsten zur PVC-Bedruckung eingesetzten Verfahren sind:

- Buchdruck
- Indirekter Buchdruck
- Flexodruck
- Siebdruck
- Tiefdruck

PVC-P-Folien mit Weichmacheranteilen über 30 % können nur mit physikalisch trocknenden Druckfarben bedruckt werden. Neben dem Tiefdruckverfahren für Massenauflagen (beispielsweise Dekorationsfolien, Vorhänge) kommt für solche Materialien nur der Siebdruck in Frage.

Der Weichmacheranteil von Haftfolien liegt unter 30%. Sie sind deshalb bedingt im Offset- und Buchdruckverfahren zu bedrucken. Meist wird eine Kombination mit dem Siebdruck vorgenommen. Bei dieser Kombination wird zunächst weiße oder bunte Siebdruckfarbe bei deckendem Material vorgedruckt; bei transparentem PVC wird ein Offset- bzw. Buchdruckgrund in transparenter Einstellung im Siebdruckverfahren aufgetragen. Dadurch können auf den Haftfolien auch Vierfarbendrucke mit Rasterfeinheit hergestellt werden, die im Siebdruckverfahren nur schwer erreichbar sind. Die Druckfarben werden anschließend mit speziellen farblosen Siebdrucklacken geschützt; auf diesem Wege erhält man ausreichend kratzfeste und lichtechte Haftetiketten.

Weichmacherfreies PVC lässt sich mit physikalisch trocknenden Druckfarben im Tief-, Flexo- und Siebdruck problemlos bedrucken. Im indirekten Hochdruckverfahren werden z. B. Deckel und Becher für Verpackungen mit schnell laufenden Spezialmaschinen in vier Farben und einer Schutzlackierung hergestellt. Nach jedem Durchgang durch ein Farbwerk werden die Trockenwege durchfahren, in denen die Farben mit Warmluft oder UV-Strahlung getrocknet werden [6]. Mit speziellen Tampondruckmaschinen können auch Profile oder Panels aus PVC mit Holz- oder Marmordekor bedruckt werden [11].

4.9 Prägen

Beschichtungen oder Folien aus PVC-U und PVC-P besitzen hervorragende Prägeeigenschaften. Das Prägen kann in kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Verfahren durchgeführt werden. Von den diskontinuierlichen Verfahren wird für PVC aus Qualitätsgründen nur das Heizprägen eingesetzt. Dazu wird eine kalte Folie oder Platte mit einer auf etwa 90 bis 160°C beheizten Matrize geprägt. Eine Variante des Heizprägens stellt das Farbprägen dar. Bei diesem Verfahren wird zwischen dem Kunststoff und dem Prägestempel eine Farb- oder Metallfolie eingelegt. Die technisch und wirtschaftlich größere Bedeutung besitzen kontinuierliche Prägeverfahren.

Beim Prägen im Zweiwalzenkalender werden die Präge-, Mattier- oder Glättwalze und die gummierte Walze durch Keilriemen mit gleicher Umfangsgeschwindigkeit angetrieben. Der Walzenspalt und -druck ergeben sich durch Heben und Senken der Prägewalze. Die Gegendruckwalzen sind mit einem dicken Gummimantel versehen. Die Härte oder Weichheit der Gummierung richtet sich dabei nach dem Pragemuster: Grobe Narbungen werden mit weichem Gummimantel, feine Pragemuster mit einem härteren Gummibelag gefahren. Für das Prägen von PVC-Beschichtungen sind Prägekalender mit beheizten Stahlwalzen ungeeignet. Da weiches PVC im warmen Zustand an den heißen Stahlwalzen anklebt wird es vorgeheizt und in ein kaltes Prägewerk eingefahren. Zusätzlich wird die gummierte Gegenwalze ebenfalls innen und außen gekühlt.

Ein weiteres Prägeverfahren ist das Prägen im Schmelzwalzwerk. Bei diesem Verfahren geht es in erster Linie um die Herstellung von Verbundwerkstoffen, wobei in den meisten Fällen PVC als Beschichtungswerkstoff eingesetzt wird. Als Substratschicht kann in diesem Fall Papier, Baumwollgewebe, Vlies oder Polyesterfilz eingesetzt werden. Darüber hinaus existieren Anlagen zum gleichzeitigen Kaschieren und Prägen. Diese Anlagen sind für maximal 3 Bahnen ausgelegt und bieten eine Vielzahl an Variationsmöglichkeiten zur Herstellung von Verbundwerkstoffen. Prägen erfolgt im Normalfall unter Druck – und Wärmeeinwirkung. Prägestrukturen können aber auch durch Gieß- und Streichverfahren auf genarbten Unterlagen erzeugt werden [6].

5 Zusammenfassung

PVC ist ein Material, das in vielen Anwendungsfeldern wie z. B. im Bauwesen, für die Automobilindustrie, in der Medizin oder für Verpackung technologisch sinnvoll und kostengünstig eingesetzt werden kann.

In vielen Anwendungsgebieten (Lebensmittelverpackungen, Spielwaren, Medizinprodukte, Bauprodukte) stellen umfassende gesetzliche und normative Anforderungen sicher, dass Materialien sicher eingesetzt werden können. Kunststoffe wie PVC spielen hier keine Sonderrolle. Gerade unter Berücksichtigung eines vielfältigen Anforderungsprofils zeigt sich sehr häufig, dass PVC nicht nur die technisch richtige Wahl darstellt, sondern auch der sicherste und kostengünstigste Werkstoff ist.

Das niedrige Bauteilgewicht von PVC-Produkten im Vergleich zu Alternativwerkstoffen führt zu Energieeinsparungen in Anwendungsbereichen wie Verpackung und Verkehr. Leichtere Fahrzeuge verbrauchen weniger Kraftstoff, leichtere Verpackungen führen zur Kraftstoffersparnis bei der Verteilung. Aufgrund der Dauerhaftigkeit von PVC kann bei manchen Anwendungen von einer Lebensdauer von über 100 Jahren ausgegangen werden - trotz der Einwirkung von Sonnenstrahlen, Hitze oder Chemikalien. Da langlebige Produkte wenig Wartung benötigen, sprechen diese für eine effiziente Ressourcennutzung.

PVC ist ein flexibles Material, das sich durch den Zusatz von Additiven mit einer Vielzahl von Verarbeitungsverfahren verarbeiten lässt. PVC kann sehr gut mit allen gängigen Thermoplastverarbeitungsverfahren verarbeitet werden. Darüber hinaus lässt es sich auch mit Pasten-Verfahren wie Rotationsformen, Sprühauftrag, Tauchverfahren und Streichverarbeitung verarbeiten. PVC hat eine hohe Schmelzestabilität und lässt sich einfach zu komplexen Strukturen wie z.B. Fensterprofilen verarbeiten. PVC besitzt einen geringen Energieinhalt. Dadurch wird bei der Verarbeitung wenig Energie zur Erwärmung und vergleichsweise wenig Zeit beim Abkühlen der Produkte benötigt. PVC ist ein weitgehend amorpher Werkstoff, der sehr gut erforscht ist. PVC ist auch gut recyclingfähig, wie die Initiativen der PVC-Industrie zum werkstofflichen und rohstofflichen Recycling von PVC zum Teil im großtechnischen Maßstab zeigen.

PVC weist ein sehr gutes Preis-Eigenschaftsverhältnis auf. Durch die Zusammensetzung des PVC aus Steinsalz und Erdöl ist der Preis dieses Werkstoffes auch weniger stark als andere Kunststoffpreise vom Erdölpreis abhängig.

PVC lässt sich durch den Zusatz von Additiven zu einem anforderungsgerechten weichen oder harten Werkstoff ausrüsten. PVC ist einer der wenigen Werkstoffe, die auch im weichen Zustand sehr transparent sein können. Ebenso hat PVC als Ausgangswerkstoff einen sehr guten inhärenten Flammenschutz. Kritische Stoffe in Stabilisatoren und Weichmachern von PVC werden zunehmend durch unbedenkliche, aber oftmals auch teurere Ersatzprodukte ersetzt.

Die Nutzung bestimmter Stoffe wie z. B. von Weichmachern oder Stabilisatoren ist aus Umweltgründen in die öffentliche Kritik geraten und hat zum Ausschluss solcher Stoffe geführt - teilweise freiwillig durch die Industrie und teilweise durch gesetzliche Auflagen. Das gilt auch für Additive, die bei der Rezeptierung von PVC verwendet wurden. Dabei konnte das gleiche Anforderungsprofil wie vor der Substitution erreicht werden.

PVC kann mit vielfältigen Methoden relativ einfach nachbehandelt werden. Es kann verstreckt, gebogen, aber auch mittels Thermoformen umgeformt werden. Mit den spangebenden Formverfahren Sägen, Drehen, Hobeln, Stoßen, Fräsen, Feilen, Schleifen und Polieren kann das

Material ebenfalls bearbeitet werden. PVC lässt sich sehr gut kleben, schweißen und ohne Vorbehandlung lackieren.

Diesen Umfang an Werkstoffeigenschaften, anwendbaren Verarbeitungs- und Nachbearbeitungsverfahren weist praktisch kein anderer thermoplastischer Werkstoff auf. Der Wunsch, PVC durch andere Werkstoffe zu substituieren, führte in vielen Fällen aus technologischer Sicht zu suboptimalen Lösungen.

Um insgesamt nachhaltige Lösungen zu erzeugen, werden neben den technischen auch ökologisch, soziale und ökonomische Aspekte relevant. Nur durch Abwägung aller Aspekte können nachhaltige Werkstoffe und daraus hergestellte Produkte realisiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Josef Ertl, Jürgen Luderer, Oliver Meiden, Ismaning
Polyvinylchlorid (PVC)
Kunststoffe 10/2004
Carl Hanser Verlag
München
Seite 53-57
- [2] Dr. Hans K. Felger (Hrsg.)
Polyvinylchlorid - Kunststoff Handbuch 2/1
Carl Hanser Verlag
München, 1985
- [3] Hrsg. Eyerer, Elsner, Hirth
Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften
6. Auflage
Springer Verlag
Berlin, Heidelberg 2005
- [4] Hrsg. VDI-Gesellschaft-Kunststofftechnik-Düsseldorf
PVC: Rezeptierung, Aufbereitung, Verarbeitung und Recycling
VDI-Verlag
Düsseldorf, 2002
- [5] Dr. Hans Zweifel
Plastics Additives Handbook
5th Edition
Carl Hanser Verlag
München, 2000
- [6] Dr. Hans K. Felger (Hrsg.)
Polyvinylchlorid - Kunststoff Handbuch 2/2
Carl Hanser Verlag
München, 1985
- [7] Hans-Peter Schneider
Mehr Durchsatz, weniger Verschleiß- Neue PVC-Rohrextruder für hohe
Füllstoffanteile
Kunststoffe Jahrg. 91 (2001) 10
Carl Hanser Verlag
München
Seite 150-154
- [8] Franz Grajewski, Henning Steglitz
Extrudieren von weichen PVC-Folien
Kunststoffe 10/2003
Carl Hanser Verlag
München
Seite 169-172

- [9] Dieter Gittel
Alternative Werkstoffe für Kinderspielwaren
Zwischenbericht L-Bank
FKZ: 4-4332.62-ICT/22
gefördert durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg
Teilbericht Rotationsformen; S. 24 bis 29
Mai 2002
Projektbericht unveröffentlicht
- [10] Jörg Gehrke et. al
PVC-Fensterprofile ohne Lösungsmittel kaschieren
Kunststoffe 12/2000
Carl Hanser Verlag
München
Seite 46-49
- [11] M. Dominik
Die Vielfalt der Produktverschönerung
Kunststoffe 9/2004
Carl Hanser Verlag
München
Seite 143-152
- [12] Daten, Fakten, Perspektiven
Broschüre AGPU, API, PVCH, VKE
2003
- [13] <http://europa.eu.int/comm/environment/pvc/index.htm>
Stand: 12.05.2005