



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014 – 2020

Luboš Běhálek
Pavel Brdlík
Martin Borůvka
Irena Lenfeldová

EINFÜHRUNG IN DIE KUNSTSTOFFTECHNOLOGIEN

Einführung in die Kunststofftechnologien

Luboš Běhálek • Pavel Brdlík • Martin Borůvka • Irena Lenfeldová



Autoren: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.
Ing. Martin Borůvka
Ing. Irena Lenfeldová, Ph.D.

Dieses Buch wurde im Rahmen des Projekts: Nr. 100252772 „Grenzübergreifender Lehrverbund Kunststofftechnik Zittau – Liberec (GreK)“ erstellt. Das Projekt wurde aus Mitteln der Europäischen Union (des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung), im Rahmen des Kooperationsprogramms Freistaat Sachsen - Tschechische Republik 2014-2020, gefördert.



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014-2020

Projektpartner: Hochschule Zittau / Görlitz 
Technická univerzita v Liberci 
Technische Universität Dresden 

Gutachter: *doc. Ing. Jozef Dobránsky, PhD. – TU Košice (Slowakei)*
Editor: *Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.*
Satz, Umschlaggestaltung: *Ing. Petr Weinlich, Ph.D.*
Übersetzung: *Hana Galbavá, DiS.*
Korrektur: *B.Eng. Albrecht Schilling, Michelle Zuischko,*
Dr.-Ing. Ondřej Kotera

© Běhálek, Brdlík, Borůvka, Lenfeldová (Technische Universität in Liberec) – 2019

ISBN 978-80-7494-459-8

Vorwort

Im Laufe der Geschichte der menschlichen Zivilisation würde man wohl kaum einen Werkstoff finden wie Kunststoff, der in der relativ kurzen Zeit seiner Existenz in derart viele Bereiche menschlicher Tätigkeit übergegriffen hat. Kunststoffe gehören zu den meistverwendeten Werkstoffen der Gegenwart und ihre Verwendbarkeit steigt unaufhörlich. Ihr Vorteil gegenüber anderen Werkstoffen besteht in ihrer großen Vielfalt und der Variabilität ihrer Eigenschaften, sei es im Bereich Festigkeit, Elastizität, thermische oder chemische Beständigkeit u. ä. Einer der vielen Vorzüge der Kunststoffe neben einer ganzen Reihe von Vorteilen (geringe Dichte, gute isolierende Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit etc.) ist ihre gute Verarbeitbarkeit durch nicht-energieintensive, serientaugliche Technologien. Möglichkeiten, wie Kunststoffe verarbeitet werden können, gibt es mehrere. Eine der meistverbreiteten ist das Spritzgießen, weitere Verfahren sind Extrusion, Blasformen oder auch Thermoformen. Kunststoffe lassen sich auch durch Rotationsformen, Gießen, Walzen, Laminieren oder mithilfe additiver Technologien verarbeiten. Des Weiteren können sie geklebt, geschweißt, zerspannt werden oder eine Oberflächenbehandlung erhalten.

Der Umfang der Skripten kann nicht sämtliche genannten Bereiche abdecken, ebenso wenig ist es möglich, alles in erschöpfender Weise zu beschreiben. Dies ist im Übrigen gar nicht beabsichtigt. Die Skripten richten sich vor allem an Studenten des Bachelorstudiengangs der Hochschule Zittau/Görlitz und der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität in Liberec. Ihr Ziel ist es, die Studenten in die Thematik Kunststoffe und deren grundlegenden Verarbeitungstechnologien, insbesondere die Technologien zur Verarbeitung von Thermoplasten, einzuführen. Vom Umfang her decken die Skripten Themen von sieben Vortragszyklen ab, die parallel für Studenten in Zittau und Liberec abgehalten werden. Das erlangte Wissen wird durch neue Erkenntnisse in weiteren Fächern des daran anknüpfenden Masterstudiums ausgebaut und ergänzt.

Luboš Běhálek

Inhalt

1 Kunststoffe Einleitung (Polymere)	1
<i>Luboš Běhálék</i>	
1.1 Synthese der Kunststoffe (Polymere)	1
1.2 Chemische und Molekulare Struktur der Polymere	6
1.3 Übermolekulare Struktur von Polymeren	9
1.4 Grundaufteilung der Polymere	12
1.5 Additive für Polymere	16
1.6 Thermisches Verhalten von Polymeren	21
1.7 Übersicht über die Basis-Polymere	25
2 Vorbereitungen	27
<i>Pavel Brdlík</i>	
2.1 Materialtransport	27
2.2 Mischung und Dosierung der Werkstoffe	29
2.3 Granulieren und Recycling	31
2.4 Trocknung	33
3 Spritzgussverfahren	36
<i>Irena Lenfeldová</i>	
3.1 Prinzip des Spritzgussverfahrens	38
3.2 Technologische Parameter vom Spritzgießprozess	47
3.3 Schwindungen der Kunststoffformteile	47
3.4 Spritzgießmaschinen	49
3.5 Spritzgießwerkzeuge	52
4 Spritzgießsonderverfahren	56
<i>Irena Lenfeldová</i>	
4.1 Spritzgießen von Duroplasten	56
4.2 Spritzgießen von Gummi, Kautschuk	58
4.3 Spritzgießen von Silikonen	59
4.4 Spritzgießen von Glas gefüllten Thermoplasten	61
4.5 Gasinjektionstechnik	62
4.6 Wasserinjektionstechnik	66
4.7 Sandwich-Spritzgießverfahren	67
4.8 Mehrkomponentenspritzgießen	69
4.9 Intervall-Spritzgießen	76
4.10 Marmorierung	76
4.11 Pulver-Spritzguss-Verfahren	77

4.12	Spritzgießen von Metall-Legierungen	79
4.13	Niederdruck-Spritzgießen	80
4.14	Spritzprägen	83
4.15	Tandem-Spritzgussverfahren	85
4.16	Hochdruckspritzguss – X-melt	86
4.17	Strukturschaum-Spritzgießen	87
4.18	Hinterspritz-Verfahren	91
4.19	Hinterspritzen von Organoblechen	93
4.20	Mikrospritzgießen	94
4.21	Schweißen im Spritzgießwerkzeug	95
4.22	Weitere Sonderspritzgießverfahren	96
5	Extrusionverfahren	98
	<i>Pavel Brdlík</i>	
5.1	Herstellung von Rohrleitungen und Profilen	104
5.2	Herstellung von Platten und Folien	109
5.3	Blasfolienextrusion	112
5.4	Kabelextrusion	114
5.5	Coextrusion	116
6	Blasformen	118
	<i>Pavel Brdlík</i>	
6.1	Extrusionsblasformen	119
6.2	Spritzblasverfahren	125
6.3	Streckblasen	128
7	Rotationsformen	130
	<i>Pavel Brdlík</i>	
7.1	Materialdosierung	132
7.2	Material- und Formerwärmung	132
7.3	Formen des Teils – Rotation der Form	133
7.4	Materialabkühlung	134
7.5	Entformung des Teils	134
8	Thermoformen	135
	<i>Pavel Brdlík</i>	
8.1	Erwärmung des Halbzeuges	136
8.2	Formen	139
8.3	Abkühlung des Teils	144
8.4	Stanzen vom Werkstück und Thermoformmaschinen	145

9 Fügen von Kunststoffteilen	147
<i>Martin Borůvka, Luboš Běhálék</i>	
9.1 Kunststoffschweißen	147
9.1.1 Schweißseignung der Werkstoffe	149
9.1.2 Heizelementschweißen	150
9.1.2.1 Stumpfschweißen	153
9.1.2.2 Polyfusion-Schweißen	155
9.1.3 Ultraschallschweißen	155
9.1.4 Vibrationsschweißen (Reibschweißverfahren)	158
9.1.5 Rotationsschweißen	160
9.1.6 Hochfrequenzschweißen	162
9.1.7 Warmgasschweißen	164
9.1.8 Extrusionsschweißen	166
9.1.9 Laserschweißen	168
9.2 Kleben von Kunststoffen	170
9.2.1 Einfluss der Kunststoffe auf die Festigkeit der Klebverbindung	172
9.2.2 Klebstoffarten	172
9.2.3 Konstruktion von Klebverbindungen	174
9.2.4 Anwendung der Klebverbindungen	176
Literaturverzeichnis	177

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Pavel Brdlík von der Technischen Universität in Liberec für die grafische Aufbereitung der ausgewählten Bilder.

KUNSTSTOFFE EINLEITUNG (POLYMERE)

1

Kunststoffe sind **polymere Werkstoffe**, die aus großen Molekülen bestehen, den sog. **Makromolekülen** (griechisch macros = groß, lang). In ihnen wiederholt sich der Bestandteil der Kette - die **konstitutionelle Einheit** „mer“ - in einer oder mehreren Formen (siehe Abb. 1.1). Das griechische Präfix *poly-* bedeutet *viele* oder *mehrere*. Aus der chemischen Sicht sind Polymere Werkstoffe **organischer, synthetischer** oder **natürlicher** Herkunft (sie können auch anorganisch sein, z.B. Silikonkautschuk). Typische Beispiele der organischen Werkstoffe sind Holz, Pflanzen, Erdöl, Erdgas und viele andere. Was sie jedoch von den Kunststoffen, bzw. Polymeren unterscheidet, ist dass sie aus kleinen Molekülen bestehen. Die Größe (Länge) der Makromoleküle wird mit der **molaren Masse** dargestellt. Als makromolekulare Stoffe werden Verbindungen bezeichnet, deren molare Masse höher als 10^3 g/mol, bei Polymeren höher als 10^4 g/mol ist. Zu den natürlichen Polymeren gehört Naturkautschuk, Stärke, Zellulose, Schellack oder auch Bernstein (mineralisiertes Harz aus den tertiären Nadelbäumen), es ist das älteste Polymer.

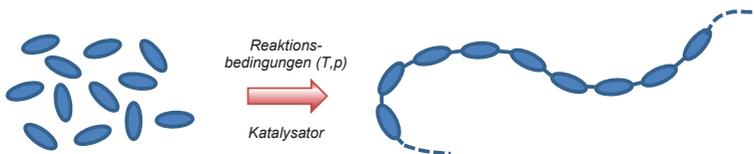


Abb. 1.1 Schema der Makromolekülsynthese

1.1

Synthese der Kunststoffe (Polymere)

Synthetische Polymere – Kunststoffe - werden aus niedermolekularen organischen (bzw. anorganischen) Verbindungen hergestellt, den sog. **Monomeren**. Sie werden insbesondere aus **Erdöl**, bzw. Erdölfraktionen des **Erdgases**, aber auch aus **pflanzlichen** und **tierischen** Produkten gewonnen, z.B. Maisstärke, Rübenzucker (aus denen z.B. Milchsäure gewonnen wird, die der Grundstoff für PLA Biokunststoff, Polymilchsäure ist), Rizinusöl (Rizinusölsäure ist das Grundstoff für PA 11) u.a. Herstel-

lungsgrund synthetischer Polymere war die Imitation der guten Eigenschaften natürlichen Polymere.

Für die Vorbereitung synthetischer makromolekularer Werkstoffe werden drei Grundverfahren verwendet: *Polymerisation* (Kettenreaktion), *Polykondensation* und *Polyaddition* (Stufenwachstumsreaktionen). Es handelt sich um chemische Reaktionen, sog. *Polyreaktionen*. Sie wiederholen sich vielfach, sodass die ursprünglich niedermolekulare *monomere Verbindung* in einem makromolekularen Werkstoff, dem *Polymer*, übergeht. Zu einer Polyreaktion kann es kommen, wenn das Monomer im Molekül mindestens zwei reaktionsfähige Funktionsgruppen enthält. Die *Polyfunktionsfähigkeit eines Monomers* kann durch die Anwesenheit der Mehrfachverbindungen in dem Monomermolekül (siehe Abb. 1.2) verursacht werden. Dank dieser Bindungen sind die Monomere reaktiv und fähig, Kettenmakromoleküle zu bilden. Chemische Grundstoffe der makromolekularen Werkstoffe sind C und H, oft auch N, O, F, S und Cl.

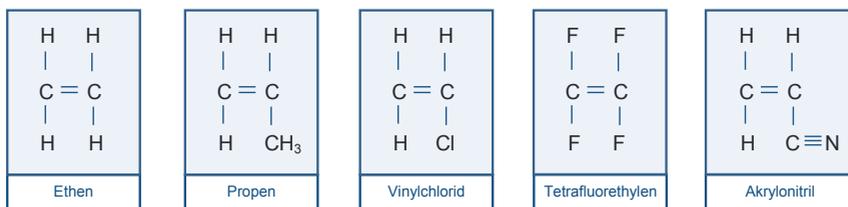


Abb. 1.2 Strukturformel der niedermolekularen Werkstoffe (Monomere) für die Vorbereitung von Polymeren

- **Polymerisation** ist eine chemische Reaktion, bei der die Monomermoleküle miteinander reagieren. Die Chemiker sagen, sie „öffnen“ die Doppelbindungen (aus dem Monomer entsteht eine monomere Einheit) und verbinden sich in lange Polymerketten, die aus Millionen Atomen gebildet werden können. Das Polymer, das sich auf dieser Weise bildet, bekommt standardmäßig den von dem Ausgangsmonomer abgeleiteten Namen mit Ergänzung der Vorsilbe *Poly-*, z.B. *Polyethylen* (PE), *Polypropylen* (PP), *Polystyrol* (PS), *Polyakrylonitril* (PAN), *Polyvinylchlorid* (PVC), *Polytetrafluorethylen* (PTFE) u. a.

Die Polymerisation wird von den reaktiven Werkstoffen, den sog. Initiatoren (I), gestartet bzw. von den Produkten ihrer Zersetzung die z.B. durch den Einfluss der

thermischen Energie, der UV-Strahlung usw. verursacht werden kann. Es handelt sich um Radikale ($R\bullet$) oder bei polarisierten Monomeren um Ionen (Kationen und Anionen), die die Mehrfachbindung in dem Monomermolekül aufspalten. Diesen Prozess wird *Initiierung* genannt. Als Initiator können Peroxide, alkalische Metalle, organische Metalle u.a. tätig sein. Nach der Spaltung der Mehrfachbindung entsteht ein neues, robusteres Radikal oder ein Ion, das wiederum mit weiteren Monomermolekülen reagiert. Die Kette wächst. Diese Phase bezeichnen wir als die *Propagation*. Das Wachstum der makromolekularen Ketten endet beispielsweise mit der Verbindung von zwei Radikalen oder mit dem Verbrauch des ganzen Monomers. Das wird als *Terminierung* bezeichnet. Ein Beispiel der radikalischen Polymerisation von *Polyethylen* (PE) ist in der Abb. 1.3 dargestellt.

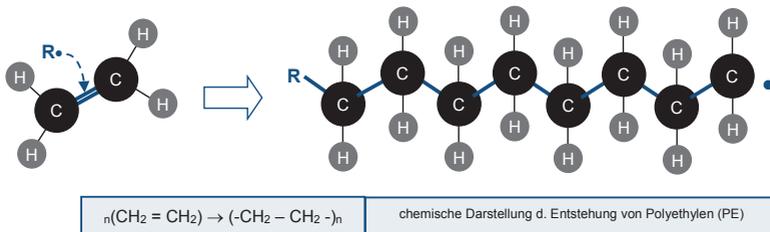


Abb. 1.3 Schema der Radikalenpolymerisation von *Polyethylen* (PE) aus den niedermolekularen Ethen-(Ethylen-)Molekülen

- **Polykondensation** ist die Bezeichnung für eine chemische Reaktion, bei der Makromoleküle durch vielfach ablaufende Kondensation der gleichen oder unterschiedlichen *Monomere* und *Oligomere* entstehen (niedermolekulare Werkstoffe mit kurzen Ketten, zusammengesetzt aus mehreren Meren; Oligos = wenige), die zwei oder mehrere reaktive Atomgruppen enthalten. Im Verlauf der Reaktion entsteht nicht nur ein Polymer, sondern auch ein niedermolekulares Nebenprodukt (z.B. Wasser, Methanol, Ammoniak), das sich bei jeder weiteren Anbindung der Monomereinheit abtrennt. So entstehen Polymere mit einer bestimmten charakteristischen chemischen Gruppe, z.B. *Amiden-, Esther-, Ether-*.

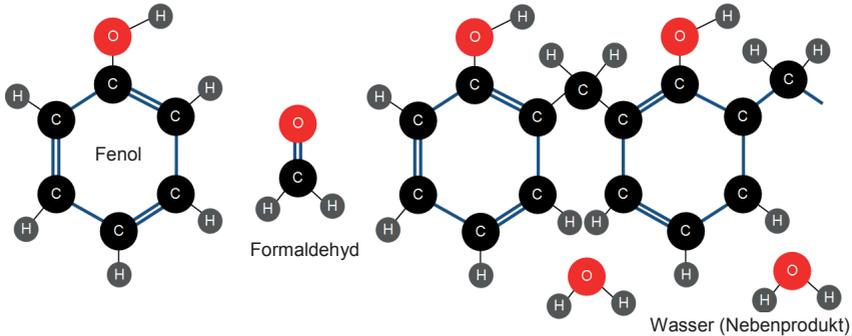


Abb. 1.4 Schema der Fenol- und Formaldehydcondensation

Polyamide, Polyester (z.B. *Polyethylenterephthalat* - PET) und auch Polyether (z.B. *Polyetheretherketon* - PEEK) werden also durch die Polykondensation gebildet, die die Amid-, Esther- oder Etherbindungen bilden. Zum ersten Mal wurde die chemische Reaktion im Jahre 1907 bei der Herstellung vom *Phenol-Formaldehydharz* (PF) durch die Kondensation von Phenol und Formaldehyd, angewendet, siehe Abb. 1.4. Die Geschwindigkeit der Polykondensation ist gegenüber der Polymerisation, die ein Bruchteil einer Sekunde dauern kann, deutlich geringer. Die Reaktion kann in einer beliebigen Phase unterbrochen und fortgesetzt werden (z.B. Fortsetzung der Reaktion bei der Verarbeitung zum Endprodukt).

- **Polyaddition** ist die Bezeichnung für eine chemische Stufenwachstumsreaktion, bei der zwei unterschiedliche Arten von Monomeren zusammen reagieren, die in dem Molekül reaktive Atomgruppen enthalten, siehe Abb. 1.5. Es entsteht dabei jedoch kein Spaltprodukt, sondern es verschiebt sich das Wasserstoffatom von einer reaktiven Gruppe zu einer anderen (von einem Monomer zu einem anderen), wodurch die Verbindung (Addition) initiiert wird. Durch Polyaddition entstehen z.B. *Polyurethane* (PUR) und *Epoxidharze* (EP).

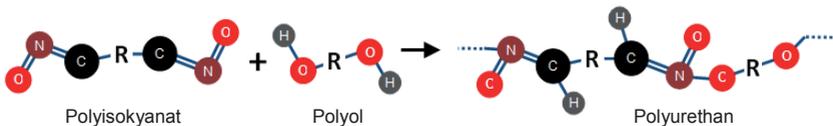


Abb. 1.5 Schema der Vorbereitung von Polyurethan (PUR) durch Polyaddition
(Bem.: R= Polyether; Polyester)

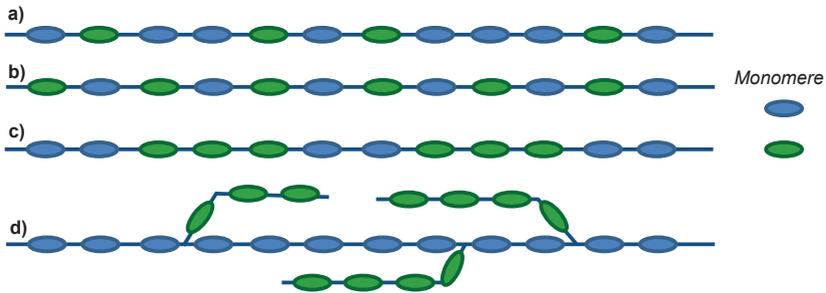


Abb. 1.6 Schema der Copolymer-Makromoleküle

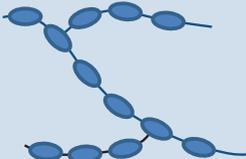
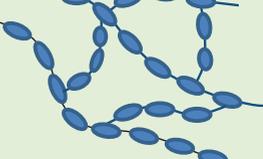
a) statistisches Polymer; b) alternierendes (abwechselnd) Polymer;
c) Blockcopolymer; d) Pfropfcopolymer

Die Polymersynthese kann in der Reaktionsumgebung bei Anwesenheit eines Monomer Typs verlaufen. Das Endprodukt wird als **Homopolymer** bezeichnet. An der Reaktion nehmen zwei oder mehr Monomere teil. In dem Falle wird das Endprodukt als **Copolymer** (auch *Terpolymer* - entsteht aus drei Typen von Monomeren) oder *Multipolymer* (entsteht aus vier oder mehreren Monomer Typen) bezeichnet. Die Copolymerisation hat in der technischen Praxis eine erhebliche Bedeutung. Sie ermöglicht, die physikalischen Eigenschaften des Polymers in eine gewünschte Richtung zu beeinflussen. Je nach Reaktionsbedingungen entsteht durch die Copolymerisation ein *statistisches Copolymer* (die Monomereinheiten verteilen sich in der Kette zufällig), ein *alternierendes (abwechselndes) Copolymer* (die Monomereinheiten verteilen sich in der Kette regelmäßig), ein *Blockcopolymer* (die Monomereinheiten bilden kohärente Kettenabschnitte) oder ein *Pfropfcopolymer* (Blöcke eines Monomer Typs sind auf das Gerüst eines anderen Monomer Typs aufgepfropft), siehe Abb. 1.6. Die Eigenschaften vom Copolymer sind durch den Typ der monomeren Einheiten, deren Menge und Anordnung in den Makromolekülen gegeben. Ein Beispiel vom Copolymer ist beispielsweise das *Styrol-Acrylnitril* (SAN). Dabei handelt es sich um einen Styrol-Kunststoff. Dieser entsteht nicht nur durch die Styrol-Polymerisation, deren Ergebnis ein brüchiges *Polystyrol* (PS) ist, es nimmt auch Acrylnitril an der Reaktion teil. Das Endprodukt heißt Styrol-Acrylnitril und besitzt, anders als das Standardpolystyrol, eine geringere Schlagempfindlichkeit.

nennen wir **polare Polymere**. Im Gegensatz zu **unpolaren Polymeren**, die keine elektrischen Dipole haben, sind die Ladungen symmetrisch angeordnet. Dabei handelt es sich um *Polyethylen* (PE), *Polypropylen* (PP), *Polystyrol* (PS) und *Polytetrafluorethylen* (PTFE).

Durch die Synthese von Polymeren entstehen makromolekulare Ketten, die entweder **linear** (als Fädchen oder Perlenschnüren), oder **verzweigt** (als Baumwurzel) oder **vernetzt (maschig)**, in eine kohärente dreidimensionale Struktur (siehe Tab. 1.1) miteinander verbunden sein können. Auch lineare Makromoleküle enthalten in der Regel eine geringe Anzahl von kurzen Verzweigungen.

Tab. 1.1 Schematische Darstellung der Form von Polymer-Makromolekülen und ihrer Eigenschaften

Linear	Verzweigt	Vernetzt
 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Größere Dichte ▪ Höhere Festigkeit ▪ Höheres E-Modul ▪ Niedrigere Zähigkeit ▪ Niedrige Viskosität d. Schmelze ▪ Einfache Kristallinität 	 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleinere Dichte ▪ Niedrigere Festigkeit ▪ Niedrigerer E-Modul ▪ Höhere Zähigkeit ▪ Niedrigere Wärmebeständigkeit ▪ Höhere Viskosität ▪ Schlechtere Kristallinität 	 <p>Die Eigenschaften sind von der Netzdichte abhängig. Mit größerer Dichte zeigt das Material in der Regel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Festigkeit ▪ Hohes E-Modul ▪ Wärmebeständigkeit ▪ Sehr niedrige Zähigkeit

Lineare Makromoleküle werden durch die Verbindung von Monomeren mit zwei Funktionsgruppen während der Reaktion gebildet. Bei Mehrzweckmonomeren entstehen verzweigte oder vernetzte Makromoleküle. Die vernetzte Struktur kann jedoch auch nachträglich entstehen, wenn zwischen linearen oder verzweigten Makromolekülen Querverbindungen angeschlossen werden (typisch für Vulkanisation von Harz, bzw. Vernetzung von Thermoplasten). Durch Vernetzung von Makromolekülen wird ihre Bewegung als Einheit eingeschränkt. Solche Polymere sind unlöslich und nicht schmelzbar, ihre Zähigkeit wird schlechter. Es erhöht sich jedoch die Härte, das E-Modul und die Wärmebeständigkeit.

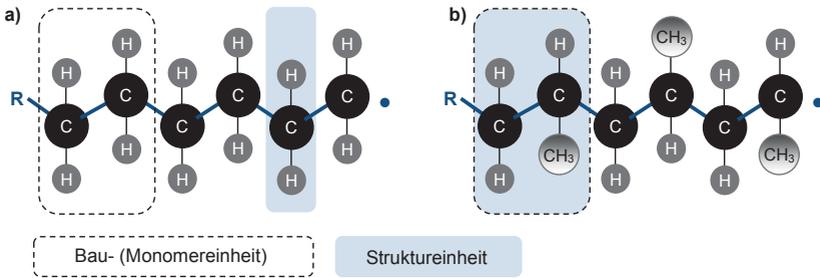


Abb. 1.7 Schema des Wachstums der Makromolekülkette
(a) von Polyethylen, (b) Polypropylen

Einen wesentlichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Polymers hat, neben seinen chemischen und strukturellen Charakteristiken, auch die Form, Länge und Verteilung der Moleküle. Der Einfluss der Form der Makromoleküle auf die Eigenschaften des Polymers ist in der Tabelle 1.1 angeführt und auch am Beispiel des gängigsten Polymers, des Polyethylens, in der Tabelle 1.2 dargestellt. Das Makromolekül eines linearen Polyethylens von hoher Dichte ist das einfachste unter allen Polymermolekülen. Es entsteht durch die Polymerisation aus niedermolekularem Ethen, dessen Molekül zwei Atome Kohlenstoff mit einer Doppelbindung enthält. Diese haben an beiden Seiten durch Einfachbindungen Wasserstoffatome gebunden (siehe Abb. 1.3). Ethen ist ein Gasprodukt mit einer Schmelztemperatur von $-169\text{ }^{\circ}\text{C}$ und hat eine molare Masse von 28g/mol . Während der Polymerisation kommt es zur Aufspaltung der Mehrfachbindungen und zur Verbindung der monomeren Einheiten. Die Schmelztemperatur der wachsenden Kohlenwasserstoffkette wächst dabei von $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ für achtzehn Kohlenstoffe einer Kette über $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ für siebenzig Kohlenstoffe auf bis zu $132\text{ }^{\circ}\text{C}$ für Kohlenwasserstoffe mit fünf tausend Kohlenstoff Atomen in der Kette. Es hat eine molare Masse von $70\ 000\text{ g/mol}$. Das herkömmliche Polyethylen besitzt eine molare Masse von $100\ 000\text{ g/mol}$. Die weitere Vergrößerung der Molekülkette hat praktisch keinen Einfluss mehr auf die Schmelztemperatur (T_m), jedoch auf die Viskosität der Schmelze. Die Molare Masse und ihre Verteilung beeinflusst nicht nur die Temperatur und Viskosität der Schmelze, sondern auch die physikalischen Eigenschaften des Polymers, wie seine Elastizität, Festigkeit, Wärmebeständigkeit, Löslichkeit und weitere Eigenschaften (mit einer höheren molaren Masse vergrößert sich die Festigkeit (σ_m), E-Modul (E_i) und Formbeständigkeit des Poly-

mers, jedoch sinkt die Dehnung und Löslichkeit). Neben der **molaren Masse** wird die Größe der Makromoleküle mit dem **Polymerisationsgrad** ausgedrückt, der die Anzahl der Struktureinheiten des Makromoleküls angibt, siehe Abb. 1.7.

Tab. 1.2 Eigenschaften von Polyethylen in Abhängigkeit der Form der Makromoleküle

Polyethylen Typ	Form der Makromoleküle	ρ [g/cm ³]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	T_m [°C]
PE-HD	Linear	0,940 - 0,960	18 - 35	700 - 1400	105 - 115
PE-LD	Verzweigt	0,914 - 0,928	8 - 23	200 - 500	130 - 135

Industriell hergestellte Kunststoffe sind Mischungen aus unterschiedlich großen Makromolekülen mit ungleicher Molekülmasse (bzw. Polymerisationsgrad). Es hängt von verschiedenen Bedingungen, insbesondere durch die Auswahl von Katalysatoren, ab. So können sich Kunststoffe aus einer schmalen oder breiten Verteilung der Molekülmassen zusammensetzen. Je nach Breite der Verteilung unterscheiden sich die Werkstoffe voneinander sehr deutlich. Beispielsweise sind Werkstoffe mit einer breiten Verteilungskurve elastisch und beständig gegen Rissbildung und -verbreitung. Für Polyethylen bieten die Hersteller beispielsweise beide Typen an.

1.3

Übermolekulare Struktur von Polymeren

Das lineare Makromolekül wurde hier in Form eines Fädchens oder einer Perlenkette mit einer Länge von bis zu 2 500 nm vereinfacht dargestellt. In Wirklichkeit bilden die Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen in der Hauptkette des Makromoleküls einen Winkel von etwa 109°, wie in der Abbildung 1.7 gezeigt. Mit steigender Temperatur können Segmente der Makromoleküle rund um diese Bindungen ohne Beschränkung rotieren. Im Bereich der Schmelze nimmt das Makromolekül mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Kugelform, auch *Knäuel* genannt, ein. In der Schmelze sind die Makromoleküle zueinander unregelmäßig angeordnet. Dieser Zustand entspricht dem amorphen Zustand - vergleichbar mit Spaghetti auf einen Teller (für übliche optische Mikroskope sind die Maße des größten Makromoleküls zu klein).

Bei der Abkühlung der Schmelze können zwei Anordnungen der Makromoleküle auftreten: *amorph* und (*teil*)*kristallin*. Das hat eine große Bedeutung für die äußeren Eigenschaften des Polymers.

- Unter **amorpher Struktur** wird eine Struktur ohne Ordnung (chaotisch) verstanden. Die Makromoleküle verbleiben als zufällige Knäule, die miteinander verzweigt werden können (siehe Abb. 1.8a). Alle Standardtypen der Polymere können eine amorphe Struktur besitzen.

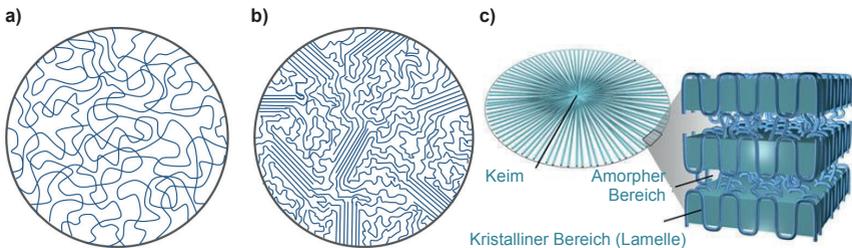


Abb. 1.8 Übermolekulare Struktur von Polymeren

(a) amorph; (b) teilkristallin; (c) Sphärolithmodell mit kristallinen Lamellen

- **(Teil)kristalline Struktur** tritt nur bei Thermoplasten auf (siehe Kap. 1.4) und zeichnet sich durch eine gewisse Anordnung von Molekülen aus, d.h. dass im Gefüge eines teilkristallinen Kunststoffes jeweils ein amorpher Anteil vorhanden ist. Diese kristallinen Domänen (sog. *Kristalliten*) werden von allen Seiten mit dem Rest, der in die amorphe Phase übergegangen ist, umschlossen (siehe Abb. 1.8b). Kristalline Bereiche bilden leichter Makromoleküle mit einfacher regelmäßiger Kette, bzw. mit kurzen, regelmäßig aufgestellten Nebenkette. Den Anteil der Kristallinen Phase in der Polymerstruktur, der nicht nur von Strukturbedingungen, sondern auch von kinetischen Einflüssen bei seiner Verarbeitung (Geschwindigkeit der Abkühlung) abhängig ist, wird *Kristallinitätsgrad* genannt. Eine vollständige Kristallisation (von Monokristallen) ist unter realen Bedingungen der Polymerverarbeitung nicht erreichbar. Dies ist nur unter Laborbedingungen aus verdünnten Lösungen machbar.

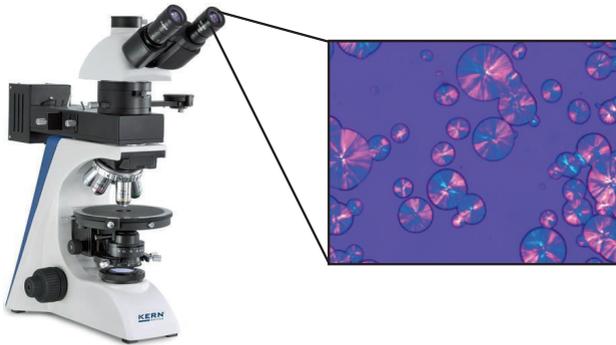


Abb. 1.9 Sphärolith-Struktur des Polymers
bei der Untersuchung seiner Struktur mithilfe der optischen Mikroskopie

Die innere Struktur, wie es beispielsweise im Elektronenmikroskop zu sehen ist, nennt sich Morphologie. Der morphologische Grundbaustein eines teilkristallinen Kunststoffes wird *kristallische Lamelle* genannt, siehe Abb. 1.8c. In der Lamelle, wie auch im Monokristall, sind die Moleküle senkrecht zu ihrer größten Fläche angeordnet. Im Gegenteil zu Monokristall jedoch verlassen einige Moleküle die Lamelle, dringen durch die amorphe Phase und können sich noch an weitere Lamellen anbinden. Die Anwesenheit solcher bindenden Moleküle ist wichtig für die Kohäsion des Polymermaterials. Wenn die Schmelze bei dem Erstarren genug Zeit hat, gruppieren sich die kristallinen Lamellen in komplizierte Gebilde. Diese sind zentralsymmetrisch und werden *Sphärolithe* genannt. Bei der Entstehung wachsen vom Zentralkeim enge schleifenähnliche Kristallin-Lamellen in alle Richtungen - manchmal in regelmäßiger Schraubenstruktur. Zwischen ihnen bleibt das amorphe Polymer. Durch die Verbindung vieler Sphärolithe entsteht die *sphärolithische Struktur*. Diese kann im Polarisationsmikroskop beobachtet werden (siehe Abb. 1.9). Die Hauptmerkmale der übermolekularen Struktur entstehen im Verlauf der Polymerabkühlung. Wenn die Kristallisation mit einem Phasenwechsel verbunden ist (das Polymer geht von der Schmelze in den festen Zustand über), ist von der sog. *primären Kristallisation* die Rede. Diese kann jedoch auch noch im festen Zustand stattfinden (oft auch mehrere Tage danach) und wird *sekundäre Kristallisation* genannt. Sie ist oftmals mit der Änderung der Bauteilummaße und seiner Eigenschaften verbunden und stellt somit eine ungewollte Erscheinung dar.

Äußere Auswirkungen der Kristallisation:

- *Erhöhung der Dichte, Festigkeit, E-Modul, Härte, chemischen und Wärmebeständigkeit* des Polymers durch den Einfluss der engeren Anordnung der Makromoleküle im kristallinen Bereichen.
- *Senkung der Dehnung und der Schlagfestigkeit* des Polymers.

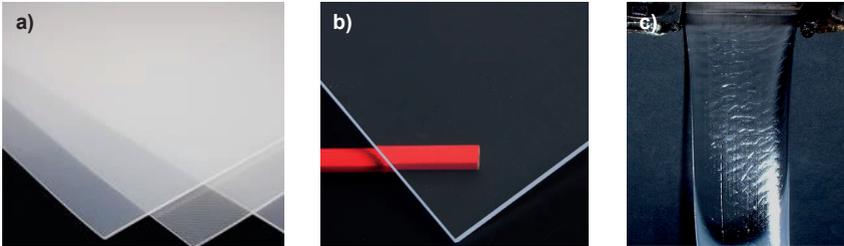


Abb. 1.10 *Optische Eigenschaften der Polymere*

a) *Trübung des teilkristallinen PP; b) transparentes amorphes PS; c) schrittweises Verlieren der Transparenz der PP-Schmelze in Folge der Abkühlung (Kristallisation) an der Luft*

- *Trübung des Polymers.* Die Kristalline Phase hat einen anderen Brechungsindex als die amorphe Phase. An der Grenze beider Phasen kommt es beim Lichtdurchgang zur Streuung (übliche amorphe Polymere sind transparent – das Licht dringt ohne Veränderung durch das Material), siehe Abb. 1.10. Die Intensität der Trübung hängt vom Kristallinitätsgrad ab. Bei der Erwärmung oberhalb der Schmelztemperatur der kristallinen Bereiche wird das Material wieder transparent, da beim aufschmelzen die kristalline Struktur aufgebrochen wird und sich bei der Abkühlung nach konkreten Bedingungen anordnen wird, siehe Abb. 1.10c.

1.4

Grundaufteilung der Polymere

Makromolekulare Werkstoffe werden nach dem Verhalten bei erhöhten Temperaturen in *Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere und thermoplastische Elastomere* aufgeteilt.

- **Thermoplaste** sind Werkstoffe mit *linearen* oder *verzweigten* Makromolekülen, die bei üblicher Umgebungstemperatur fest sind, durch die Erwärmung in einen bestimmten Temperaturbereich jedoch in einen plastischen Zustand übergehen und

leicht verformen lassen. Durch Abkühlung werden sie wieder fest und behalten dadurch die ihnen verliehene Form bei. Während der Erwärmung verläuft keine chemische Reaktion ab. Ebenso verändert sich bei der Verarbeitung ihre chemische Struktur nicht (es handelt sich nur um eine physikalische Erscheinung). Der Werkstoff kann wiederholt in den plastischen Zustand übergehen. Durch wiederholte Erwärmung können sich jedoch seine Eigenschaften (in Folge der Degradierung – Aufspaltung der Makromoleküle) verschlechtern. Zu den Thermoplasten zählen z.B. PE, PP, PS, PVC, POM, PET, PBT usw.

- **Duroplaste** sind Werkstoffe, die durch die erste Erwärmung in den plastischen Zustand übergehen und sich leicht verformen lassen. Dauert die Erwärmung länger, kommt es schrittweise zur *Vernetzung der Makromoleküle* (Aushärtung), bis sie erstarren, und dadurch ihre Form beibehalten, siehe Abb. 1.11.

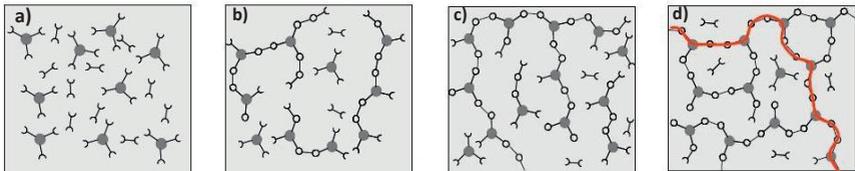


Abb. 1.11 Strukturänderungen bei der Aushärtung von Harzen

a) Monomere Moleküle; b) Bildung von kurzen Ketten (sog. Oligomeren); c) lineares Wachsen und Verzweigung der Makromoleküle; d) vernetzte Struktur mit einigen nicht vernetzten Monomeren und Molekülen

Zur Aushärtung bedarf es nicht zwangsläufig den Einfluss von Temperatur, sondern kann auch durch einen Vernetzungsreagens (Aushärter) stattfinden, bzw. auch beides. Durch wiederholte Erwärmung gehen sie nicht mehr in den plastischen Zustand über, können nicht geschmolzen oder aufgelöst werden. Ebenso ist das zusammenschweißen nicht möglich (das Aushärten ist eine irreversible chemische Reaktion). Die Vernetzung der Makromoleküle hat eine hohe Festigkeit, bei erhöhter Schlagempfindlichkeit des Werkstoffes zur Folge. Duroplaste werden nach dem nicht ausgehärteten Zustand des Harzes benannt. Dazu zählen PF, EP, UF, MF, UP u.a.

- **Elastomere** sind sehr flexible (elastische) Werkstoffe mit geringer Steifigkeit. Sie können unter Standardbedingungen bei einer kleinen Kraft ohne Beschädigung deformiert werden. Diese Deformation ist überwiegend reversibel. Zu den typischen Vertretern gehören Kautschuke, aus denen durch Vulkanisation (*kovalente Vernet-*

zung von Makromolekülen, meistens mit Schwefel) Gummis hergestellt werden – ein sehr flexibles und gegen dauerhafte Deformation beständiges Material. Gummi ist ein vulkanisiertes Elastomer. Chemische (Quer-) Bindungen zwischen den Makromolekülen, die die Knoten des Raumnetzes bilden, charakterisieren das Material. Typische Kautschuke sind beispielsweise IR, SBR, NBR, CR und EPDM.

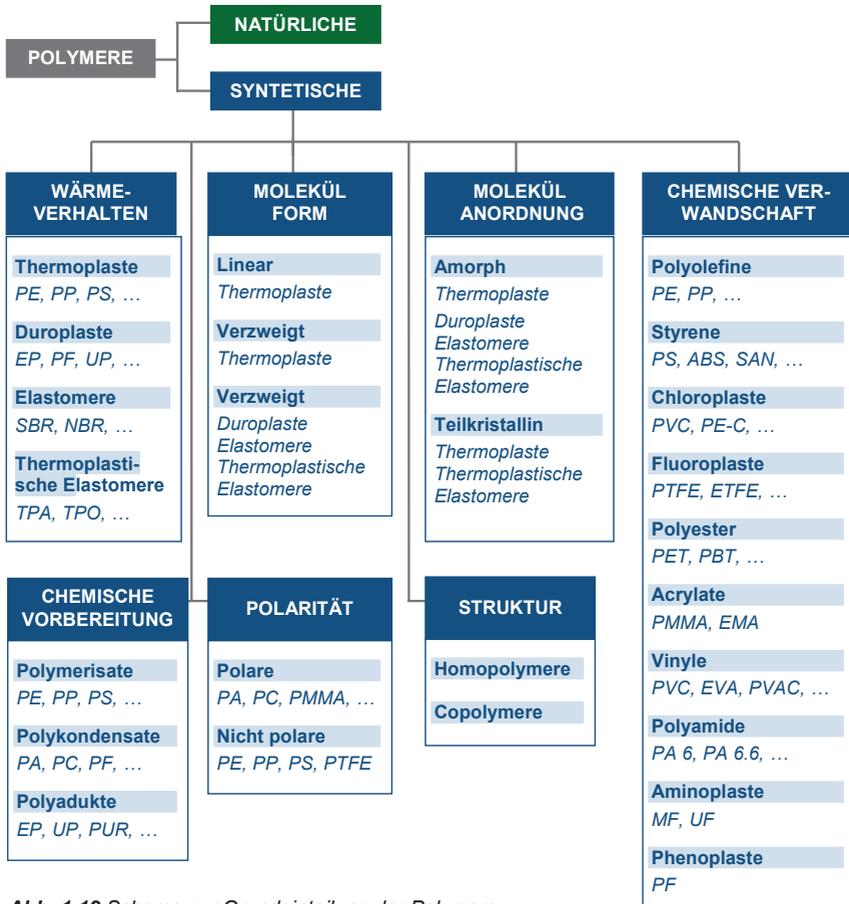


Abb. 1.12 Schema zur Grundeinteilung der Polymere

- **Thermoplastische Elastomere (TPE)** sind Werkstoffe, die sowohl die Eigenschaften von Gummi (Flexibilität) als auch die der Thermoplaste (durch Erwärmung wiederholt in den plastischen Zustand übergehen) kombinieren. Ihre Struktur ist

durch weiche (Elastomere) und feste Segmente (Thermoplaste) gebildet, siehe Abb. 1.13. Der Hauptunterschied zwischen den thermoplastischen Elastomeren und den Gummis ist die Vernetzung. Bei Gummis (vulkanisiertes Kautschuk) werden zwischen den Makromolekülen die kovalenten Vernetzungen gebildet (vulkanisierte Kautschuke sind chemisch weitmaschig vernetzte Raumnetzwerke). Thermoplastische Elastomere haben in Teilbereichen physikalische Vernetzungspunkte (Nebervalenzkräfte oder Kristallite). Nach dem inneren Aufbau unterscheidet man Blockcopolymerer und Elastomerlegierungen. Blockcopolymerer besitzen innerhalb eines Moleküls Hart- und Weichsegmente. Elastomerlegierungen sind Polyblends, also Mischungen von fertigen Polymeren, der Kunststoff besteht also mehreren Molekülsorten. Thermoplastische Elastomere erzielen nicht die elastischen Eigenschaften wie Gummis. Sie sind jedoch mit üblichen, für Thermoplaste bestimmten Maschinen, fertigbar und können mehrfach verarbeitet werden (Recycling).

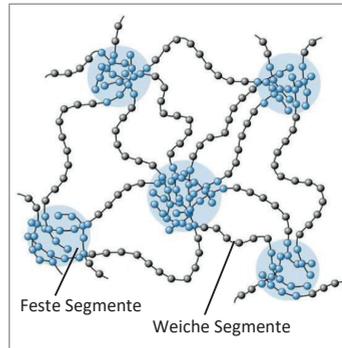


Abb. 1.13 Struktur von TPE, entstanden durch Copolymerisation

Polymere können nach verschiedenen Merkmalen aufgeteilt werden, siehe Abb. 1.12. Eine andere Möglichkeit der Klassifizierung geht von ihrer Stellung auf dem Markt aus. Dabei wird zwischen drei großen Kunststoffklassen unterschieden: **Standardkunststoffe**, die das größte der Herstellungs- und Verbrauchsvolumen stellen und für breite Verwendung bestimmt sind, **Konstruktionskunststoffe**, die bessere Eigenschaften besitzen und **Hochleistungskunststoffe**, die einzigartige Eigenschaften aufweisen und für Spitzenanwendungen bestimmt sind. Diese Klassen können schematisch in eine Pyramide aufgestellt werden, siehe Abb. 1.14. Von unten nach oben wächst die Qualität, Wärmebeständigkeit, aber auch der Preis des Werkstoffes.

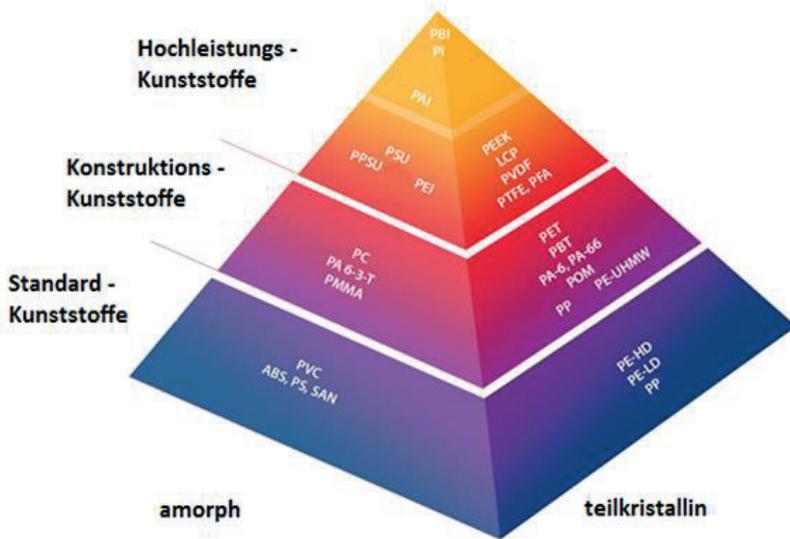


Abb. 1.14 Aufteilung der Polymere nach ihrer Position auf dem Markt

1.5

Additive für Polymere

In der Regel enthalten Polymere der industriellen Praxis verschiedene **Additive**, mit denen ihre Eigenschaften modifiziert und entsprechend der Kundenanforderungen auf konkrete Applikationen angepasst werden können. Die Grundeigenschaften der Werkstoffe sind jedoch immer durch den Polymertyp bestimmt. Die Additive verbessern diese Eigenschaften, schützen den Werkstoff gegen Degradation (Abbauprozesse, die zur Abspaltung von Mono- als auch Oligomeren führen), verbessern seine Verarbeitbarkeit bzw. senken seinen Preis. Die Grundaufteilung der wichtigsten Polymeradditive wird mit Abb. 1.15 deutlich.

Plastifikatoren – Additive, die die mittlere molare Masse der Kautschuke senken und ihre Verformbarkeit beim Kneten erleichtern (Öle, Bitumen).

Schmierstoffe (*Lubricants*) – verbessern die Viskosität der Schmelze bei der Verarbeitung und/oder erleichtern die Entnahme des Teils aus der Form (Paraffine, Fettsäuren, Glycerin, usw.). Es wird angenommen, dass die Schmiermittel mehr oder weniger beide Aufgaben erfüllen. Dies hängt von der Löslichkeit des Polymers und des Schmierstoffes ab. Stoffe, die im Polymer gut löslich sind, verringern die Viskosi-

tät der Schmelze und erleichtern seine Verarbeitbarkeit. Die im Polymer wenig auflösbaren Stoffe dringen zur Oberfläche durch, bilden auf ihr eine Schicht, die die Entnahme aus der Form erleichtert. Schmierstoffe verbessern oft auch weitere Eigenschaften des Produkts, z.B. die Oberflächengestaltung, Wärme- und Lichtstabilität oder die Witterungsbeständigkeit.

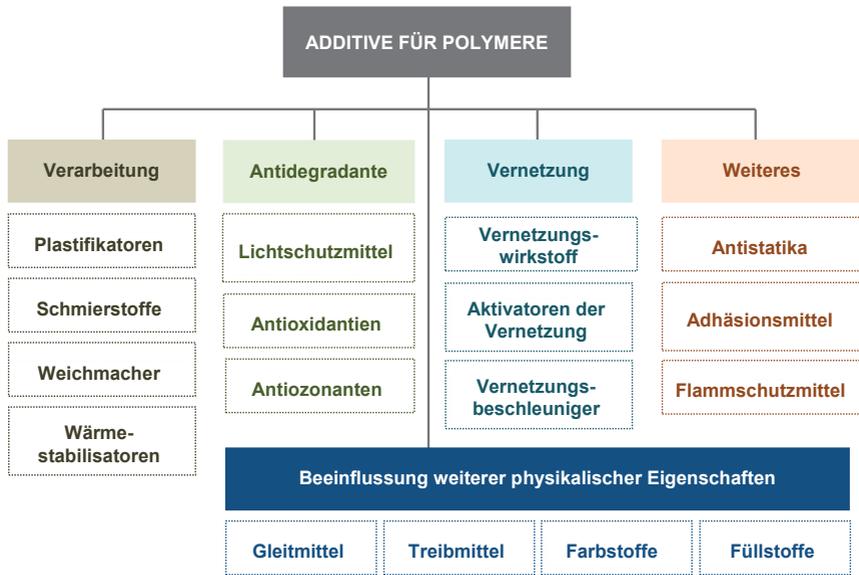


Abb. 1.15 Additive für Polymere

Weichmacher – organische Flüssigkeiten, die sich bei hoher Temperatur zersetzen, die Viskosität der Schmelze verringern, die Verarbeitung des Kunststoffs verbessern, ihre Biegefähigkeit, Formbarkeit und Schlagzähigkeit erhöhen (es kommt zur Entfernung der Makromoleküle, Senkung der zwischenmolekularen Kräfte und Erhöhung der inneren Beweglichkeit der Makromoleküle).

Wärmestabilisatoren – ihre Aufgabe ist es degradierende Prozesse (Autoxidierung, Vernetzung, Aufspaltung der Makromoleküle, Dehydrochlorierung) zu verlangsamen und die Beständigkeit des Polymers gegen erhöhte Temperaturen bei ihrer Verarbeitung zu verbessern.

Lichtschutzmittel – verlangsamen die Degradationsprozesse in Folge der Sonnenstrahlung (für Polymere ist die UV-Strahlung am gefährlichsten, dabei entstehen freie Radikale, die die Aufspaltung oder Vernetzung von Makromolekülen verursachen), siehe Abb. 1.16. Ein UV-Stabilisator, der den besten Schutz gegen Alterung anbietet, ist Ruß. Er lässt die UV-Strahlung nicht durch. Andere Stabilisatoren absorbieren die UV-Strahlung und wandeln sie in Wärmeenergie oder Strahlung mit einer größeren Wellenlänge um, die für die Polymere unschädlich sind.

Antioxidantien – Stoffe, die die thermische Oxidationsalterung der Polymere (Aufspaltung von Makromolekülen in Folge der Luftsauerstoffwirkung und erhöhter Temperatur) verlangsamen.

Antiozonanten – Zusatzmittel, die die Rissbildung von Gummi durch Einwirkung des Ozons verhindern (Ozon degradiert die Gummioberfläche und beschädigt sie mechanisch relativ leicht mit wachsenden Rissen, siehe Abb. 1.17).

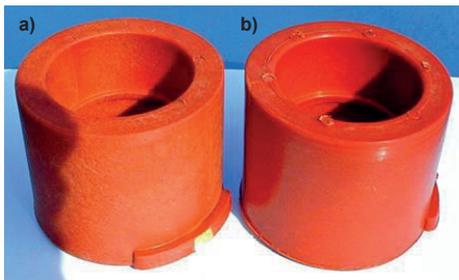


Abb. 1.16 Polyamid-Teil mit Glasfasern (a) mit Inhalt, (b) ohne Inhalt der Lichtstabilisatoren



Abb. 1.17 Gummialterung durch Ozoneinwirkung

Vernetzungswirkstoffe (Vulkanisationsmittel, Härter) – helfen bei Entstehung der Querbindungen zwischen den linearen Makromolekülen und der vernetzten Struktur (Schwefel, Peroxidverbindungen, Silan usw.). Die Vernetzungsreaktion wird durch sogenannte *Vernetzungsaktivatoren* aktiviert und durch *Vernetzungsbeschleuniger* beschleunigt (Reaktion des Vernetzungswirkstoffes mit dem Polymer verläuft manchmal sehr langsam, was in der technologischen Praxis unökonomisch ist).

Antistatika – Additive, die den hohen Widerstand der Polymeroberfläche vermindern, d.h. sie erhöhen die elektrische Leitfähigkeit und verhindern unerwünschte Auswirkungen elektrostatischer Aufladungen. Es handelt sich um stark hydrophile

Stoffe oder Stoffe mit elektrisch leitfähiger Struktur. In den Molekülen enthalten sie neben Kohlenstoff und Sauerstoff auch Stickstoff, Phosphor und Schwefel.



Die elektrostatische Aufladung ist Grund vieler unerwünschter Erscheinungen, z.B. Anheftung der Polymere an den Maschinen, Anziehung vom Staub, falsche Ergebnisse, elektrostatische Aufladungen, die Datenverlust im Speicher bewirken usw.

Adhäsionsmittel (Kompatibilisatoren) – verstärken die Adhäsionskräfte (Haftungskräfte) zwischen Füllstoff und Polymer (z.B. adhäsive Silanmittel).

Flammschutzmittel – Zusatzstoffe, die die Brennbarkeit der Polymere verringern (Brennprozess wird langsamer oder ganz verhindert), z.B. enthalten organische Verbindungen Phosphor.

Gleitmittel (Antireibungsmittel) – Zusatzstoffe, die die Gleiteigenschaften verbessern und den Reibungskoeffizient verringern (Graphit, Molybdendisulfid, Aluminiumtrioxid usw.)

Triebmittel – Zusatzstoffe, die sich bei den Verarbeitungstemperaturen der Polymere unter Entstehung von Gasprodukten (meistens Stickstoff oder Kohlendioxid) zersetzen und im Produkt geschlossene oder offene Poren bilden. Sie werden bei der Polymerverarbeitung für Leichtstoffe verwendet, das Produkt besitzt thermisch-isolierende Eigenschaften.

Farbstoffe und Pigmente – verleihen den Polymeren den gewünschten Farbton. Der Farbstoff ist entweder flüssig oder im Bindemittel gelöst, das Pigment (Farbpulver) hingegen ist im Polymer ungelöst. Der organische Farbstoff, der im Polymer gelöst ist, behält seine Durchsichtigkeit (anders als das Pigment). **Fluoreszenzpigmente** sind optisch aufhellende Stoffe, die einen Teil der UV-Strahlung aufnehmen und die aufgenommene Energie während der Beleuchtung in Form der Fluoreszenz ausstrahlen, d.h. Strahlung bei größeren Wellenlängen. Das menschliche Auge hat dann den Eindruck, dass die Farbe im Tageslicht heller/klarer ist. Bei der Färbung werden blaue, violette und rosa Töne angewendet.

Füllstoffe – es handelt sich um *organische* oder *anorganische* Stoffe (Mineralfüllstoffe), die in die Kunststoffe in Pulver- oder Kugelform (*Partikelfüllstoff*), oder als *Faser verschiedener Längen* zugegeben werden. Im Hinblick auf die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften haben sie einen *Versteifungs-* oder *Nichtversteifungscharakter*. **Nichtversteifende Füllstoffe** bewirken eine geringere Erhö-

hung der mechanischen Eigenschaften von Polymeren, sie können jedoch den Materialpreis senken oder die Schrumpfung vermindern, die Form- und Maßstabilität bei erhöhten Temperaturen sowie die Kratzbeständigkeit vom Teil verbessern (z.B. Kalziumkarbonat, Schiefermehl, Kaolin, Glimmer usw.), dem Teil einen Holzeffekt verleihen ohne dass Wartung und Schutzanstriche notwendig sind (Holzmehl), Abriebfestigkeit (Wollastonit, Glimmer) oder Beständigkeit gegen Säuren und Basen verbessern (Bariumsulfat) usw. Andere Füllstoffe können spezifische Aufgaben haben, z.B. erhöhen mikroskopische Metallpartikel die thermische Leitfähigkeit des Materials.

Versteifende Füllstoffe werden insbesondere zur Erhöhung der Steifigkeit, Festigkeit und Formbeständigkeit von Polymeren verwendet. Sie haben überwiegend eine Faserstruktur. Meist werden kurze Fasern (ca. 3 mm) oder lange Fasern (10 bis 16 mm), *Glasfasern* (GF), *Karbonfasern* (CF), *Aramidfasern* (RF), *Metallfasern* (MF(x)), *Mineralfasern* (MF), *Naturfasern* (NF) oder andere verwendet. Technische Anwendungen mit mechanischen Sonderanforderungen bei gleichzeitiger niedriger Teildichte, basieren überwiegend auf Kohlenstoffkompositen mit einer duroplastischen Matrix. Sie werden z.B. für Kfz-Chassis, Treibwellen, Sportausstattung (Fahrradrahmen, Schiffrumpfe) oder Konstruktionsteile von Flugzeugen verwendet. Es werden jedoch auch hochbelastete Teile, wie z.B. Federgehänge von Eisenbahnwagen und schweren LKWs aus Kompositen auf Glasfaserbasis, entwickelt. Zu den versteifenden Füllstoffen können auch Partikelmineralfüllstoffe auf Silikatbasis zugeordnet werden, sog. *Talk* und *Mikroglaskugeln*. Sie können hohl sein. Die hohlen Mikroglaskugeln (in der Praxis 16 μm oder 30 μm) sind leichte, jedoch sehr feste Füllstoffe. Sie bewirken eine deutliche Gewicht- und Dichtesenkung. Sie halten großen Presskräften sowohl bei seiner Verarbeitung als auch bei der Anwendung des Teils stand. Durch die Zugabe von Talk und Mikroglaskugeln kommt es bei Polymeren zur Erhöhung ihrer Härte, Schlagzähigkeit, Festigkeit, Maßstabilität, sowie der chemischen und thermischen Beständigkeit. Glaskugeln stellen außerdem auch eine Anisotropie in der Schwindung sicher. Die genannten Eigenschaften verbessern sich jedoch weniger stark als z.B. Glasfaser gefüllten Polymere.

Polymere lassen sich in Abhängigkeit der Temperatur in drei physikalische Zustände einteilen: *glasartig*, *Kautschuk-ähnlich* und *plastisch* (im festen oder flüssigen Zustand, was jedoch nicht für vernetzten Polymere gilt, also nicht schmelzbare Duroplaste und Gummis). Duroplaste können nur im glasartigen Zustand auftreten (Beweglichkeit der Ketten oder ihre gegenseitige Verschiebung ist wegen den Querverbindungen der dicht vernetzten Struktur begrenzt). Gummis, leicht vernetzte Polymere, können in glasartigen und Kautschuk-ähnlichen Zustand sein. Die beachtenswert große molare Masse der Polymere hat zur Folge, dass ihr Siedepunkt außergewöhnlich hoch ist und dieser sich in allen Fällen über der Zersetzungstemperatur befindet. Polymere im Gaszustand gibt es nicht.

Ähnlich wie bei anderen Materialien sind die Eigenschaften der Polymere Temperaturabhängig, wobei in bestimmten Temperaturbereichen diese Änderungen sprungweise beschleunigt werden. Diese Bereiche werden *Übergangsbereiche* mit charakteristischen Temperaturen genannt. Bei amorphen Kunststoffen sind die *Glasübergangstemperatur* (T_g – g englisch „glass“ – Glass) und die *Viskositätstemperatur* (T_f – f aus engl. „flow“ – Fluß) und bei teilkristallinen Kunststoffen sind neben der *Glasübergangstemperatur* die *Schmelztemperatur der kristallinen Phase* (T_m – m englisch „melt“ – schmelzen) vorhanden.

Glasartiger Zustand (bei Temperaturen eines Polymers unterhalb T_g) charakterisiert ein hartes und schlagempfindliches Polymer mit hohem Elastizitätsmodul. Zwischen den Makromolekülen gibt es starke zwischenmolekulare Kräfte. Befindet sich das Polymer in diesem Zustand unter Einfluss von Spannung, ist die Deformationen klein, sofortig und reversibel. Deformation in diesem Bereich richtet sich nach dem hookeschen Gesetz.

Kautschuk-ähnlicher Zustand (zwischen T_g und T_f , bzw. T_g und T_m) zeichnet sich mit einem Kautschuk-ähnlichen Verhalten des Polymers aus. Durch Aufwärmung über die T_g kommt es zur Schwächung der zwischenmolekularen Kräfte und zu inneren konformativen Veränderungen (Veränderungen in der räumlichen Anordnung) in der Struktur der Makromoleküle. Bei der Einwirkung äußerer Kräfte verläuft eine reversible, jedoch zeitlich verspätete viskoelastische Deformation. Diese kann mehrere hunderte Prozent betragen.

Plastischer Zustand (über der T_f , bzw. T_m) kennzeichnet sich durch den Materialfluss (Bewegung aller Makromoleküle untereinander). Das Material befindet sich im Fließbereich. Dabei sind Deformationen in diesen Bereich sehr groß, irreversibel und zeitabhängig. Mit steigender Temperatur steigt bis zu einer bestimmten Grenze auch der Viskositätsfluss, wo es zum Aufbrechen von Verbindungen sowie der Zersetzung und Degradation des Polymers kommt.

Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Temperatur des Polymers ist durch die thermomechanische Kurve dargestellt, siehe Abb. 1.18. Die Kurven haben grundsätzlich einen gleichmäßig steigenden oder sinkenden Verlauf (in Abhängigkeit von der gemessenen Größe), der durch einen heftigen Bruch in den Übergangsbereichen unterbrochen ist. Bei amorphen Polymeren kommt es zu bedeutsamen Veränderungen der Eigenschaften im Bereich der *Glasübergangstemperatur* (T_g), bei teilkristallinen Polymeren im Bereich der *Schmelztemperatur der kristallinen Phase* (T_m). Die Änderungen der teilkristallinen Polymere im Bereich T_g gelten nur für den amorphen Bestandteil dieses Polymers, d.h. je höher der Kristallinitätsgrad, desto weniger ausgeprägt ist die Änderung im Bereich T_g (siehe Abb. 1.18b). Dank des kristallinen Anteils in der Materialstruktur, bzw. den großen zwischenmolekularen Kräften in den kristallinen Bereichen, behalten die teilkristallinen Polymere ihre sehr guten Gebrauchseigenschaften auch im Bereich zwischen den Übergangsbereichen T_g und T_m .

Dank der thermomechanischen Kurven der Abb. 1.18 a, b wird deutlich, dass die Glasübergangstemperatur (T_g) sich bei amorphen Thermoplasten als eine theoretische Grenze der Anwendbarkeit erweist, wenn diese nicht mechanisch belastet werden. Bei ihrer Überschreitung kommt es zur Selbstdeformation des hergestellten Teils und zum Verlust seiner Funktionsfähigkeit (siehe Abb. 1.19). Aus praktischen Gründen wird jedoch die obere Gebrauchstemperatur um ca. 10 °C bis 20 °C niedriger gewählt. Ähnlich verhält es sich bei teilkristallinen Thermoplasten, bei der die Schmelztemperatur der kristallinen Phase (T_m) als theoretische Gebrauchsgrenze betrachtet wird. Mit Hinsicht auf die Zuverlässigkeit der Funktion des Teils wird auch in diesem Fall die obere Gebrauchstemperatur um ca. 20 °C bis 40 °C niedriger gewählt. Die Höchsttemperatur muss stets unter Berücksichtigung der Belastungsweise des Teils und der Zeit der Wärmebelastung gewählt werden.

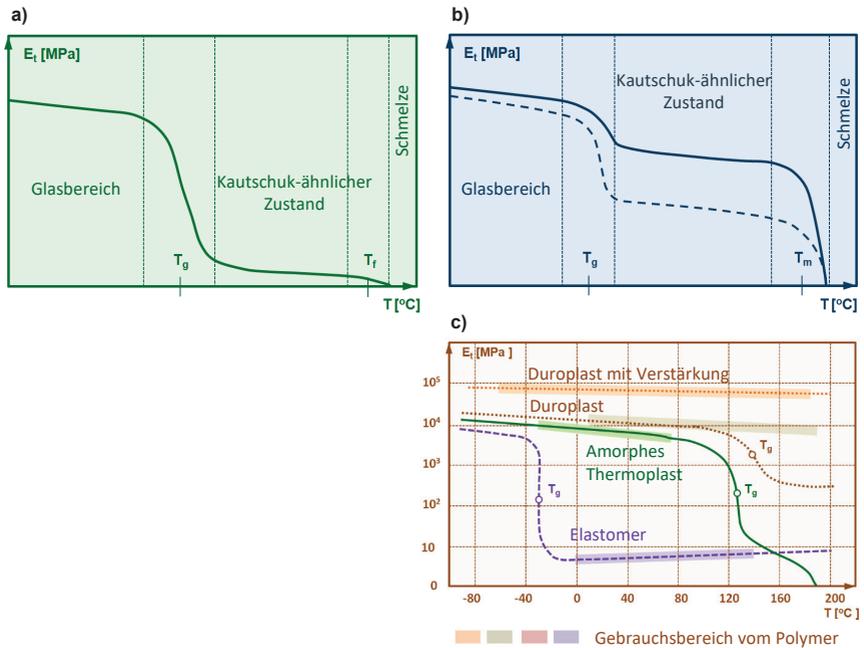


Abb. 1.18 Thermomechanische Kurven der Polymere
(E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur)

a) amorpher Thermoplast; b) teilkristalliner Thermoplast;
c) amorphe Polymere (Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere)

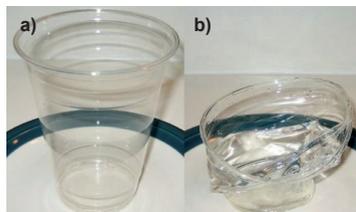


Abb. 1.19 Teil aus Biokunststoff PLA (amorph)
Zustand unterhalb (a) und oberhalb (b) der Glasübergangstemperatur (T_g)

Die Glasübergangs- und Schmelztemperaturen der kristallinen Phase sind von einigen Polymeren in Tabelle 1.3 angegeben.

Tab. 1.3 Übergangstemperaturen einiger Polymere

Polymer	Struktur	Name	Zeichen	T _g [°C]	T _m [°C]
Thermoplast	Teilkristallin	Polyethylen	PE	-120	105 - 135
		Polypropylen	PP	-15	160 - 175
		Polyoxymethylen	POM	-50	165 - 185
		Polyamid 6	PA 6	45 - 80	225 - 230
		Polyamid 6.6	PA 6.6	65 - 90	225 - 265
		Polybutylenterephthalat	PBT	40 - 60	220 - 230
	Amorph	Polystyrol	PS	85	-
		Polyvinylchlorid	PVC-U	85	-
		Polymethylmethacrylat	PMMA	110	-
		Polycarbonat	PC	140	-
Polyetherimid		PEI	215 - 230	-	
Kautschuk	Amorph	Silikon	Q	-85	-
		Naturkautschuk	NR	-70	-
		Chloropren-Kautschuk	CR	-40	-
Duroplast	Amorph	Ungesättigte Polyester	UP	> 60	-
		Epoxid	EP	> 75	-
		Phenol-Formaldehyd	PF	> 150	-

Tab. 1.4 Teilkristalline Thermoplaste

Kurzzeichen	Name
PA 6	Polyamid 6
PA 6.6	Polyamid 6.6
PBT	Polybutylenterephthalat
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen -High Density (hohe Dichte)
PE-LD	Polyethylen - Low Density (niedrige Dichte)
PE-LLD	Polyethylen - Linear Low Density
PE-MD	Středněhustotní polyethylen
PE-UHMW	Polyethylen - Ultra High Molecular Weight
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEK	Polyetherketon
PET	Polyethylenterephthalat
PI	Polyimid
POM	Polyoxymethylen Polyacetalharz Polyformaldehyd
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen

Tab. 1.5 Amorphe Thermoplaste

Kurzzeichen	Name
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ASA	Akrylnitril-Styrol-Acrylester
PC	Polycarbonat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PS	Polystyrol
PS-E	Polystyrol - Schaumstoff
PS-GP	Polystyrol – universell einsetzbar
PS-HI	Styrol - schlagzäh
PVC-P	Polyvinylchlorid - weich
PVC-U	Polyvinylchlorid - hart
SAN	Styrol-Acrylnitril

Tab. 1.6 Duroplaste

Kurzzeichen	Name
EP	Epoxid-Harze
MF	Melamin-Formaldehyd
PF	Phenol-Formaldehyd
PUR	Polyurethan
UF	Harnstoff-Formaldehyd
UP	Ungesättigte Polyester-Harze

Tab. 1.7 Kautschuke

Kurzzeichen	Name
ACM	Acrylat-Kautschuk
CFM	Fluorkautschuk
CR	Chloropren-Kautschuk
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymere
EPM	Ethen-Propylen -Kautschuk
IIR	Isobuten-Isopren- Kautschuk (Butylkautschuk)
IR	Isopren-Kautschuk
NBR	Nitril-Kautschuk
NR	Naturkautschuk
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
Q	Silikon

Tab. 1.8 Thermoplastische Elastomere

Kurzzeichen	Name
TPE	Thermoplastische Elastomere (allgemeine Kennzeichnung)
TPE-A (TPA)	Thermoplastische Polyamidelastomere
TPE-E	Thermoplastische Copolyesterelastomere
TPE-S (TPS)	Thermoplastische Styrol-Blockcopolymere
TPE-O (TPO)	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis
TPE-U (TPU)	Thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis
TPE-V (TPV)	Vernetzte thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis

Vor der Polymerverarbeitung sind sehr oft einige Vorbereitungsschritte notwendig. Diese Vorbehandlungen sind notwendig um die Eigenschaften des Eingangsrohstoffes zu verändern, die Qualität und die Effektivität vom Verarbeitungsprozess zu erhöhen oder den Preis zu senken. Zu den gängigsten Vorbereitungsvorgängen gehören *Mischung*, *Granulation*, *Wiederverwertung*, *Trocknung*, *Dosierung* und *Materialtransport*.

2.1

Materialtransport

Der **Transport des Polymers** in Form von Granulat oder Pulver verläuft je nach beschaffener Menge und logistischer Wirtschaftlichkeit in kleinen Säcken (20 kg bis 25 kg), in Big-Bags, in Oktabins (ein Oktabin ist ein achteckiger Pappebehälter zum Transport und zur Lagerung von Schüttgütern auf Europaletten) mit einem Gewicht von bis zu 500 kg oder mit Hilfe von Eisenbahn- oder Tankwagen, siehe Abb. 2.1. Für größere Herstellungsserien, bei denen sich das Material während des Produktionsverlaufs selten ändert, ist der Materialtransport in Tankwagen eignet. Die Beschaffung von Material in Säcken ist dagegen für kleinere Herstellungsserien mit häufigem Wechsel des Produktionssortiments geeignet.



Abb. 2.1 Transportmöglichkeiten von Polymeren

Das Material wird danach im Verarbeitungswerk gelagert und zur Produktionsanlage zugeführt. Die Säcke und Oktabins werden im Zwischenlager oder direkt am Arbeitsplatz abgestellt. Das in Tankwagen beförderte Polymer wird in Silos (Volumen ca. 20 Tonnen) gelagert. Sie sind mit Einrichtungen zur Kontrolle der Materialmenge, automatischer Reinigung, Separatoren und Staubpartikelbehältern ausgestattet. Für die Materialzufuhr vom Silo zur Fertigungsanlage wird das zentrale Beförderungssystem, siehe Abb. 2.2 genutzt. Hauptteile des Beförderungssystems sind die Rohrleitungen, Unterdruck- bzw. Überdruckpumpen, Sicherheitsfilter, Staubabscheider oder Steuereinheiten. Bei den zentralen Beförderungssystemen kann man je nach Art und Weise der Triebkrafterzeugung unter **Vakuum-** oder **Drucksystemen** unterscheiden. Die Vakuumsysteme sind für die Zufuhr vom Material auf kürzere Strecken - bis 100 Meter - geeignet. Die Überdrucksysteme eignen sich für die Beförderung von Material auf längere Strecken (bis 200 Meter). Da hier höhere Druckkräfte auftreten, muss mit einer höheren Abnutzung der Leitungssysteme gerechnet werden. Als Führungselemente werden meistens Rohrleitungen aus Aluminiumlegierungen oder rostbeständigen Stahl verwendet. Soll die Lebensdauer der Rohrleitungen erhöht werden, wird die Verwendung von Einscheibensicherheitsglas empfohlen. Dieses kann für hoch belastete Leitungsabschnitte verwendet werden.

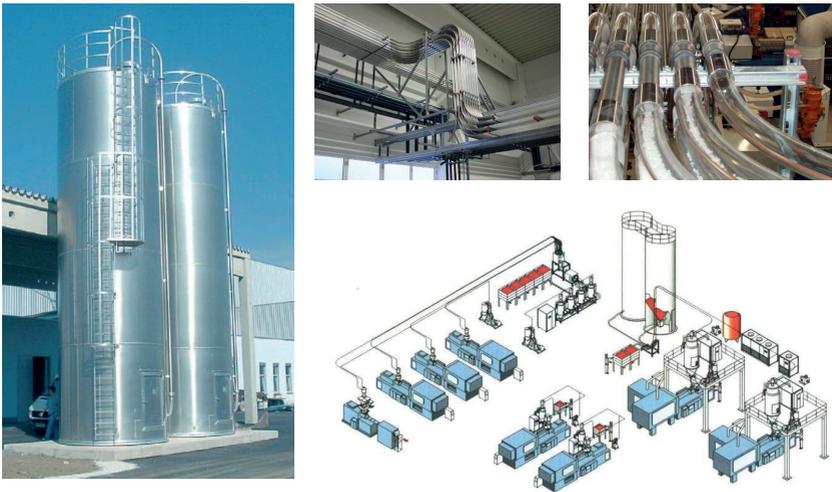


Abb. 2.2 Zentralzuführungssystem vom Material aus dem Silo

In das Grundmaterial werden sehr oft Additive in Form von Granulat, Pulver oder Flüssigkeiten zugegeben. Deren Ziel ist beispielsweise die Verbesserung der Gebrauchseigenschaften des Materials, seine Färbung oder die Preissenkung vom Endprodukt. Zum Erreichen einer hohen Produktionsqualität vom zu fertigenden Teil ist die Dispersion des Materials sehr wichtig und wird im wesentlichen Maße durch die Homogenität des Ausgangswerkstoffes bestimmt. Zu diesem Zweck werden, insbesondere in der Vorproduktionsphase, *Mischer* und *Rührwerke* eingesetzt. Bei den **Mischanlagen** unterscheiden wir nach der Achsenrotation zwischen horizontalen oder vertikalen Anlagen. Zu den gängigsten gehören die diskontinuierlichen Trommel-, Fassroll-, Band-, Doppelarm-, Planeten- und Fluidmischer, siehe Abb. 2.3 und Abb. 2.4. Insbesondere die Fluidmischer erweisen sich bei der Materialmischung als sehr effektiv. Der finale Homogenitätsgrad muss nicht schon in der Mischungsphase erreicht werden, sondern kann erst im nachfolgenden Verarbeitungsprozess (Spritzguss, Pressverfahren, usw.) erzielt werden.

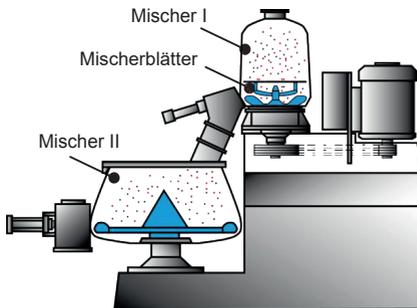


Abb. 2.3 Fluidmischer



Abb. 2.4 Planetenanordnung im Rührschneckenförderer

Andere Produktionsanlagen, mit deren Hilfe die Kunststoffe mit den Additiven vermischt werden können, sind die **Rührwerke**. Beim Rührprozess kommt es im Vergleich zum üblichen Mischen zu einer intensiveren Zugscherbelastung vom Werkstoff und seiner Umwandlung in den plastischen Zustand. Bei den Rührwerken unterscheiden wir zwischen kontinuierlichen (gleichläufigen) und diskontinuierlichen (gegenläufigen) Anlagen. Ein Beispiel für den gegenläufigen Prozess sind die Dop-

pelschneckenextruder. Es handelt sich dabei um sehr günstige Produktionsanlagen. Sie werden insbesondere für das Rühren von Kautschukmischungen verwendet. Sie zeichnen sich durch eine niedrige Leistung aus. Eine viel höhere Leistung wird mit Rührschneckenförderern erreicht. Die für das Rühren bestimmte Rührschneckenförderer enthalten im Vergleich zu den konventionellen Maschinen einige Modifizierungen, wie z.B. Röhreinlagen, eine spezielle Schneckengeometrie, Planetenanordnung der Schnecken usw. Ziel dieser Modifizierungen ist eine stärkere Zugscherbelastung und damit auch eine höhere Rührleistung, die bei üblichen Maschinen niedrig ist.

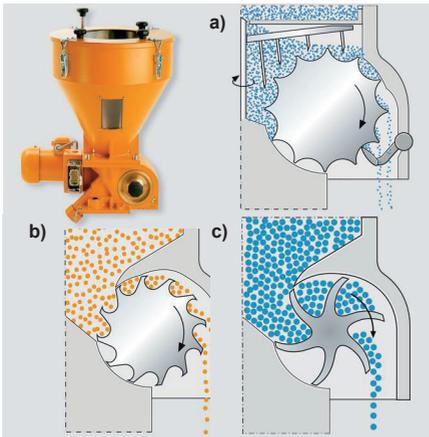


Abb. 2.5 Volumetrische Dosieranlage für Pulverwerkstoffe (a), Masterbatch (b) und Recyclat (c)



Abb. 2.6 Gravimetrische Dosieranlage

Der steigende Verbrauch von Kunststoffen und die Bemühung um ihren möglichst effektiven Verarbeitungsprozess sind die Gründe warum sich die meisten Fertigungsbetriebe nicht mit dem elementaren Mischungsprozess beschäftigen. Sie kaufen die Werkstoffe mit den Additiven in der finalen Form oder als „**Masterbatch**“ ein. Der Begriff „Masterbatch“ bezeichnet ein polymeres Material, das eine exakt definierte Konzentration von Additiven (Mineralische Füllstoffe, Farbstoffe usw.) enthält. Dieser wird in der geforderten Menge in das (reine) Grundmaterial zugegeben. Dazu werden Dosieranlagen verwendet, die sich direkt an der Spritzgießmaschine über der Schütte befinden. Die **Dosieranlagen** arbeiten volumetrisch oder gravimetrisch, siehe Abb. 2.5 und Abb. 2.6. Die volumetrischen Dosieranlagen enthalten meistens

eine Schnecke oder eine Dosierscheibe, die je nach der Drehgeschwindigkeit in die Schütte der Verarbeitungsmaschine das konkrete Materialvolumen zuführt. Vorteil dieser Anlage ist ihre Einfachheit und ein niedriger Preis. Nachteil dagegen ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Formänderungen des dosierten Materials und eine kleinere erreichbare Exaktheit (Genauigkeit $\pm 0,15 \%$). Diese Nachteile lassen sich durch die Verwendung der gravimetrischen Dosiermethode beseitigen, trotz der höheren Investitionskosten. Die Dosieranlage wiegt mit Hilfe eines Mikroprozessors genaue Menge der Materialdosis ab. Für eine bessere Materialdurchmischung sind die gravimetrischen Dosieranlagen in ihrem Ausgangsteil sehr oft mit einfachen Mischelementen (z.B. einer Schnecke) ausgerüstet. Mit den Dosieranlagen können neben dem „Masterbatch“ auch andere Materialkomponenten, wie z.B. Rezyklate, Farbstoffe und weitere Stoffe, auch in Form von Pulver und Flüssigkeiten, beige-mischt werden.

2.3

Granulieren und Recycling

Granulieren ist ein technologisches Verfahren, das dem verarbeiteten Material die Würfel-, Perlen-/Kugel- oder Zylinderform (die meist verbreitete Rohmaterialform) verleiht. Ihre Größe hängt von der Produktionsweise und der technologischen Prozesseinstellung ab. Für viele Werkstoffe ist dies der finale Aufbereitungsschritt, der kontinuierlich an vorherige Verfahren der Mischung, des Rührens und des Mahlens vom gebrauchten Material (Recycling) anknüpft. Vorteil dieser Werkstoffform ist im Vergleich zum wiederverwerteten Mahlgut oder Pulvermaterial ihre einfache Beförderung, gute Schüttfähigkeit, Vermischbarkeit und Dosierung in die Verarbeitungsanlagen. In der industriellen Praxis sind zwei verschiedene Weisen der Granulatherstellung zu sehen: das **Granulieren aus Bändern** und das **Granulieren aus Strängen**, siehe Abb. 2.7 und Abb. 2.8. Die konkrete Wahl ist von den Eigenschaften des verarbeiteten Materials, von Dispositionsmöglichkeiten der Firma, von den erwarteten Leistungen und ökonomischen Aspekten abhängig. Granulieren aus Bändern ist ein Verfahren zur Granulatherstellung, bei dem das ausgedrückte Halbprodukt in Form einer Platte in Bänder aufgeschnitten wird, die wiederrum in Granulat in Würfel-form aufgeschnitten werden. Die Technologie ist nicht für harte Materialien, wie z.B. PVC-U, PS geeignet und hat eine geringe Produktivität. Viel effektiver ist die Granu-

latherstellung aus Strängen. Diese Methode kann in Kalt- und Heißabschlag aufgeteilt werden. Die beiden Verfahren unterscheiden sich im thermischen Zustand der Stränge im Moment ihrer Teilung. Beim Kaltgranulieren werden die Strängen durch einen Wasserfilm abgekühlt und erst dann aufgeschnitten (Zylinderform). Nachteil dieser sehr produktiven Methode (sie wird für die meisten Thermoplaste angewendet) ist die Gefahr der Strängeverklebung (insbesondere bei großen Strängenmengen), ihr Brechen und auch die Tatsache, dass ein Wasserbad bei manchen Werkstoffen eine Wassersorption verursachen kann. Beim Heißabschlag kommt es zum Abhacken der Stränge direkt an der Düse (Perlenform). Anschließend folgt die Abkühlung im Luftstrom, Sprühwasser oder Wasserstrom. Die Methode ist für die meisten Polymere geeignet. Nur Werkstoffe mit einer niedrigen Viskosität (hohe Fließfähigkeit) sind für diese Methode ungeeignet.

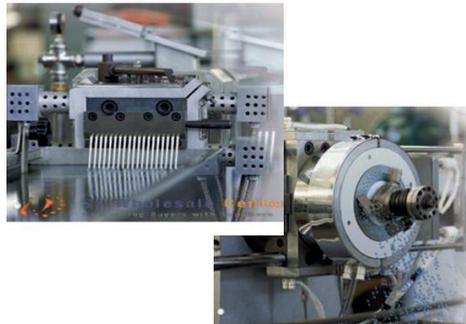
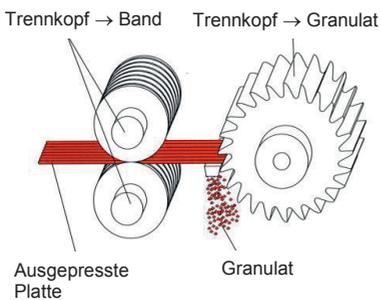


Abb. 2.7 Granulierung aus Bändern

Abb. 2.8 Granulierung aus Strängen

Sehr wichtig und in den Fertigungsfirmen oft diskutiert ist die Abfallproblematik (Recycling-Problematik). In jedem Verarbeitendem Betrieb entsteht ein bestimmtes Produktvolumen, das den Kundenanforderungen hinsichtlich der Qualität nicht entspricht. Dieser Produktionsanteil wird der „technologische Abfall“ genannt. Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Handhabung dieses Abfalls. Die erste Möglichkeit ist seine direkte Verarbeitung. Das Material wird mit Hilfe von Messer-, Teller-, Nasenmühlen und anderen Varianten zum sog. Mahlgut vermahlen. In dieser Form wird es dann im bestimmten Verhältnis zu dem Originalmaterial zugegeben oder noch vor diesem Schritt an Granulierungsstellen mit Stabilisatoren modifiziert. Das Verhältnis vom Rezyklat und dem reinen Material im Werkstück ist von vielen Faktoren abhän-

gig, wie beispielsweise die vorige Scher- und Wärmebelastung vom Material, Materialtyp einschließlich aller Zusatzstoffe und Art und Weise seiner Aufbereitung. Eine weitere Möglichkeit ist der Verkauf vom technologischen Abfall an Unternehmen, die sich mit der Problematik der Wiederverwertung beschäftigen. Diese Unternehmen verarbeiten und modifizieren neben den technologischen Abfällen auch die nicht polymerisierten Blöcke von petrochemischen Betrieben und andere gebrauchte Produkte, so dass die finalen Eigenschaften des wiederverwerteten Materials die Kundenanforderungen auf Qualität erfüllen. Das wiederverwertete Material kommt so wieder zur Verwendung. Neben dieser Materialwiederverwertung gibt es auch andere Methoden des Recyclings: energetisches Recycling in den Verbrennungsanlagen, chemisches Recycling (Aufspaltung der Polymere, Reinigung und folgende Werkstoffpolymerisation) und rohstoffliches Recycling.

2.4

Trocknung

In vielen Fällen wird zwischen dem Materialtransport aus dem Silo oder dem Lager in die Verarbeitungsanlagen ein **Trocknungsprozess** durchgeführt, da die meisten Polymere Feuchtigkeit aus der umgebenden Atmosphäre absorbieren oder an der Oberfläche feuchten. Die Feuchtigkeit hat eine Änderung der Fließeigenschaften der Schmelze zur Folge (Erhöhung der Fließfähigkeit), wodurch sie die Reproduzierbarkeit der Produktfertigungstoleranz negativ beeinflusst. Weiterhin verursacht sie u.a. die Senkung der Festigkeit und Steifigkeit vom Material, Oberflächenfehler (Schlieren) sowie versteckte Fehler (Blasen) des Produkts. Je nach Aufnahmefähigkeit der Feuchtigkeit wird das Material zwischen Polymeren mit keiner, geringer, mittlerer und sehr hoher Feuchtigkeitsaufnahme unterschieden. Ein Beispiel der Aufteilung von Werkstoffen nach der Feuchtigkeitsaufnahme im Normalklima ist in Tab. 2.1 angeführt. Die Feuchtigkeitsaufnahme von Polymeren hängt von ihrer chemischen Zusammensetzung, Additiven, Herstellungsmethode, Materialtransport und Bedingungen der Umgebung ab. Aus Sicht der chemischen Struktur kann allgemein behauptet werden, dass die Werkstoffe, die in dem Makromolekül hydrophile Gruppen (-OH, -COOH, -NH -O-) enthalten haben (die die Sorption bedingen), eine höhere Feuchtigkeitsaufnahme besitzen. Die Verwendung anorganischer Füllstoffe (z.B. gemahlener Quarz oder Glasfasern) senkt etwas die Feuchtigkeitsaufnahme.

Die Zugabe von organischen Füllstoffen auf Basis von Zellulose (z.B. Baumwolle, Holzmehl, Kokos-, Kenaf- und andere Naturfasern) erhöht dagegen die Feuchtigkeitsaufnahme. Diese Tatsache ist der Grund, warum auch unpolare (Feuchtigkeit nicht aufnehmende) Kunststoffe in der Realität Feuchtigkeit absorbieren.

Tab. 2.1 Beispiele der Feuchtigkeitsaufnahme von Polymeren und empfohlene Bedingungen der Trocknung

Kunststoff	Feuchtigkeitsaufnahme	Bedingungen der Trocknung	Kunststoff	Feuchtigkeitsaufnahme	Bedingungen der Trocknung
PE-LD	0 %	Bei ungeeigneter Lagerung: 50 - 70 °C 0,5 - 1 Stunde	PA 6	3,0 - 3,5 %	80 - 90 °C 6 - 12 Stunden
PE-HD	0 %		PA 6.6	2,5 - 3,0 %	70 - 80 °C 4 - 30 Stunden
PP	0 %	Im Ausnahmefall 80 °C 0,5 - 1 Stunde	POM	0,25 %	80 - 110 °C 1 - 3 Stunden
PS	0 %	Im Ausnahmefall 60 - 80 °C 1 - 3 Stunden	PET	0,3 %	120 - 140 °C 5 - 27 Stunden
PVC	< 0,3 %	60 - 70 °C 2 Stunde	PBT	0,25 %	90 - 120 °C 2 - 5 Stunden
PMMA	0,8 - 1,2 %	70 - 80 °C 12 - 24 Stunden	PC	0,2 %	110 - 120 °C 4 - 12 Stunden

Die Feuchtigkeit kann in dem Polymer kapillar (charakteristisch für feuchtigkeitsaufnehmende Werkstoffe oder mit organischen Zusätzen aktivierte Werkstoffe) gebunden werden oder nur auf der Oberfläche auftreten (charakteristisch für Werkstoffe, die nicht feuchtigkeitsaufnehmend sind). Die Oberflächenfeuchte kann mehrere Gründe haben: z.B. Materialtransport (starker Temperaturwechsel, der die Kondensation vom Wasser auf der Werkstoffoberfläche verursacht) oder Undichtigkeit von Verpackungen. Alle diese Aspekte, zusammen mit den hohen Anforderungen auf die Teilqualität, die insbesondere bei Sichtteilen verlangt werden, sind der Grund, warum auch für Werkstoffe, die keine Feuchtigkeit aufnehmen, Trocknung empfohlen wird. Der Trocknungsprozess wird besonders durch folgende Faktoren beeinflusst: Trocknungstemperatur und -zeit, relative Luftfeuchte, Größe des Granulats und Methode der Trocknung. Die Werkstoffe können unter Verwendung einer hohen Trocknungstemperatur, im Vakuum, einer kleinen relativen Luftfeuchte und einer kleinen

Granulatgröße schneller getrocknet werden. Im Zusammenhang mit der Verwendung einer hohen Temperatur ist jedoch auf die Gefahr der Materialdegradation hinzuweisen. Daher müssen die Trocknungsbedingungen vorsichtig gewählt werden.

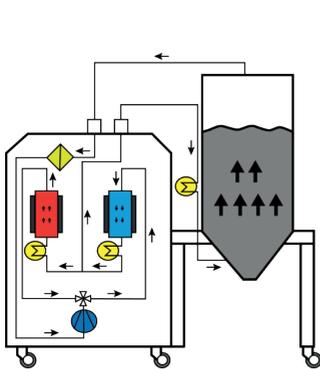


Abb. 2.9 Prinzip der Trocknung mit Trockenluft

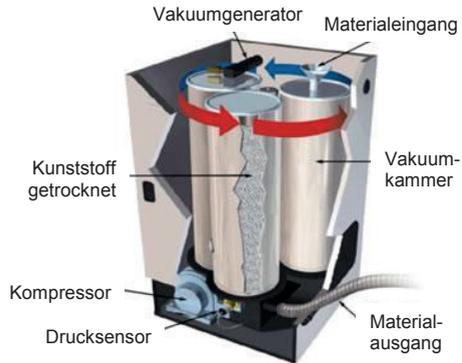


Abb. 2.10 Prinzip d. Vakuumtrocknung

Zu den gängigsten Trocknungsmethoden gehören in der Industrie die Trockenluft-, Druckluft- oder Heißlufttrocknung sowie ihre Kombination. Neben den oben genannten üblichen Trocknungsverfahren gibt es auch neue progressive Methoden, wie beispielsweise die Vakuumtrocknung, Trocknung mit wabenartigen Scheiben oder Membranen- und Mikrowellentrocknung. Beispiele für Trockner sind in den Abb. 2.9 und Abb. 2.10 zu sehen.



Die Vakuumtrockner verringern, im Gegensatz zu den Heißlufttrocknern, den Siedepunkt vom Wasser auf 56 °C. Man kann so die Trocknungszeit bis um 80 % kürzen. Dank der niedrigeren Trocknungstemperaturen ist auch das Risiko der Polymerdegradation viel kleiner.

Das **Spritzgussverfahren** ist die gängigste Technologie zur Verarbeitung von Thermoplasten, thermoplastischen Elastomeren, Mischpolymerisaten, Kompositen sowie Duroplasten, Kautschuk und Gummi. Das Spritzgussverfahren geht von der Technologie des Druckgusses aus, jedoch bei ganz unterschiedlichen Temperaturen und Fließeigenschaften der Kunststoffschmelzen.

Beim Spritzgießen werden entweder Endprodukte (Dosen, Blumentöpfe, Stoßfänger, Spielzeuge usw.) oder Halbzeuge (Zahnräder, Leuchten, Anlagenbestandteile, Klappen usw., siehe Abb. 3.1) hergestellt. Die im Spritzgussverfahren hergestellten Halbzeuge dienen zur Verarbeitung in anderen Prozessen wie z.B. Blasformen. Die spritzgegossenen Teile sind hinsichtlich der Form, Größe oder das Gewicht sehr unterschiedlich (sie können weniger als 0,1 g aber auch mehrere Kilogramm wiegen).



Abb. 3.1a Beispiele von Spritzteilen für die Automobilindustrie

Vorteile des Spritzgussverfahrens sind die Herstellung von Produkten mit einer großen Abmessungs- und Formgenauigkeit, Serienprozesswiederholbarkeit, die Erzeugung eines Endproduktes in einen Zyklus, eine ausgezeichnete Oberflächen-

qualität, sehr kurze Herstellungszyklen usw. **Nachteile** des Spritzgussverfahrens sind beispielsweise hohe Beschaffungskosten für Maschinen und Formen und die Größe der Maschinenausstattung in Bezug auf die Teilgröße. Das Spritzgießen eignet sich für die Großserien- und Massenproduktion.

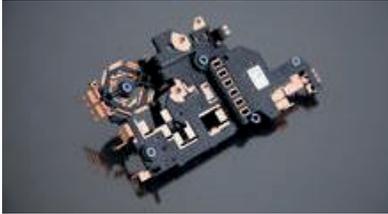


Abb. 3.1b Beispiele der Spritzteile für die Elektroindustrie

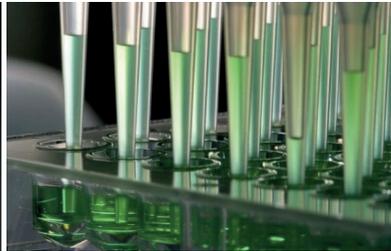


Abb. 3.1c Beispiele der Spritzteile für die Medizinindustrie



Abb. 3.1d: Beispiele der Spritzteile für die Verpackungsindustrie



Abb. 3.1e Beispiele der Spritzteile für die Verbrauchsgüterindustrie

Das *Spritzgussverfahren* ist eine Methode der Kunststoff- und Kompositverarbeitng, bei der die notwendige Materialmenge als Schmelze mittels einer Schnecke oder eines Kolbens mit großer Geschwindigkeit vom Plastifizierzylinder der Spritzgießmaschine in das geschlossene Spritzgießwerkzeug eingespritzt wird. Dort erstarrt sie in Folge der unterschiedlichen Temperaturen und Wärmeabführung (Abkühlung) zum Endprodukt.

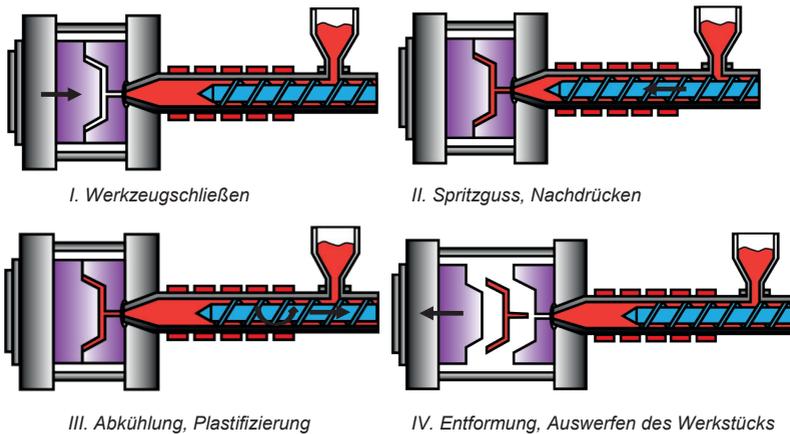


Abb. 3.2 Spritzgusszyklus

Das Prinzip des Spritzgießens ist wie folgt (siehe Abb. 3.2): reiner oder recycelter Kunststoff (meistens in Granulatform) wird in den Fülltrichter geschüttet. Aus dem Trichter wird er durch die Schnecke / den Kolben der Spritzgießmaschine abgenommen. Die Schnecke fördert den Kunststoff in den Plastifizierzylinder, wo bei gleichzeitiger Reibung und Aufheizung die Schmelze entsteht. Die Kunststoffschmelze wird nachfolgend in das Spritzwerkzeug eingespritzt (siehe Beispiel in Abb. 3.3), füllt es fast vollständig und nimmt dessen Form und Volumen an. Anschließend folgt der Nachdruck zum Vollfüllen der Kavität (Hohlraum des geschlossenen Werkzeugs mit Beachtung der Materialschrwindung, negative Form des Werkstücks) mit der Kunststoffschmelze, zur Reduktion der Schrwindung und Abmessungsänderung des Spritzteils. Beim Spritzguss und dem Nachdruck leitet der Kunststoff seine Wärme an

das Werkzeug weiter und erstarrt durch die Abkühlung zum Endprodukt. Danach öffnet sich das Werkzeug, das Werkstück wird ausgeworfen und das ganze Fertigungsverfahren wiederholt sich zyklisch.

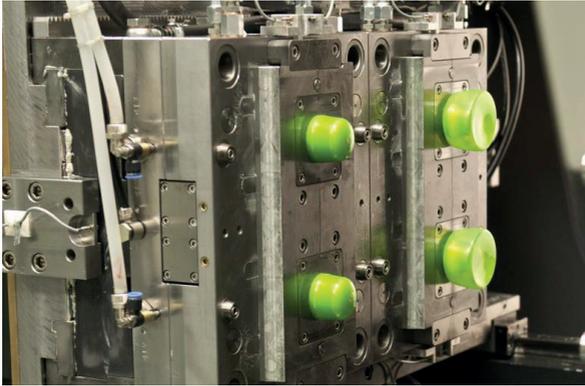


Abb. 3.3 Beispiel einer Matrize

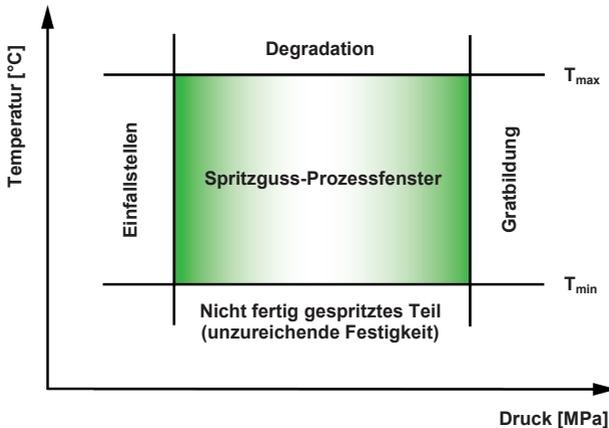


Abb. 3.4 Prozessfenster beim Spritzgussverfahren

Das Kunststoffspritzgussverfahren basiert auf einer zyklischen Wiederholung einzelner Fertigungsabschnitte. Parameter wie Temperatur und Druck bestimmen dann das sog. technologische Prozessfenster (siehe Abb. 3.4). Gute Produkte können nur entstehen, wenn die Spritzgussteile mit technologischen Parametern

innerhalb dieses Prozessfensters hergestellt werden. Bei Überschreitung dieser Grenzparameter entstehen Fehler und Defekte.

Aus technologischer Sicht können unterschiedliche Temperaturen und Drücke beschrieben werden. Die Qualität des Endproduktes wird im Wesentlichen durch die *Schmelztemperatur* (T_s), die *Kunststofftemperatur* vor der Schneckenspitze vor dem Spritzguss, die *Werkzeugtemperatur* (T_w) und die *Temperatur des Kühlmediums* (T_k) beeinflusst. Des Weiteren wird die Temperatur beim Teilauswerfen (siehe Abb. 3.5), die mittlere Temperatur beim Ausspritzen usw. bezeichnet. Die Teilqualität wird hinsichtlich der Drücke vom *Systemdruck*

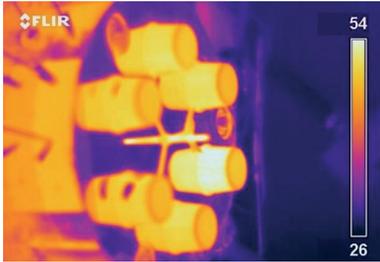


Abb. 3.5 Thermovisuelle Abbildung der Produkte in der Trennebene

(*hydraulischer Druck* p_s , im hydraulischen System der Spritzgießmaschine messbar), den *Innendruck* (p_i , der Druck der Kavität beim Spritzgießprozess) und dem *Außendruck* (p_v , der auf die Flächeneinheit im Schneckenquerschnitt vor der Schneckenspitze bezogene Druck) beeinflusst, siehe Abb. 3.6.

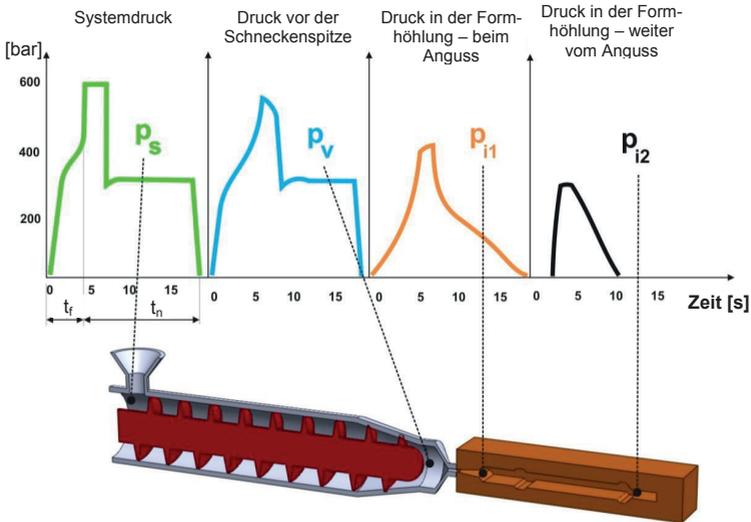


Abb. 3.6 Druckverlauf bei dem Spritzgussverfahren

t_f – Füllungszeit; t_n – Nachdruckszeit; p_s – Systemdruck (hydraulischer Druck); p_v – Druck vor der Schneckenspitze; p_i – Innendruck in der Kavität

Der **Spritzgusszyklus** wird durch eine Reihenfolge spezifizierter Phasen gebildet. Sie sind Teil der Herstellung des Spritzgussteils. Die einzelnen Arbeitsschritte dauern unterschiedlich lang. Sie werden vom Material (Kunststoff), der Konstruktion (Geometrie) des Spritzgussteils, der gewählten Technologie (technologische Bedingungen des Spritzgießens), Konstruktion des Werkzeugs und dem Typ der Maschine beeinflusst. Den Spritzgusszyklus kann mit Hilfe eines Druck-Zeit-Verlaufs in der Kavität beschrieben werden, siehe Abb. 3.7.

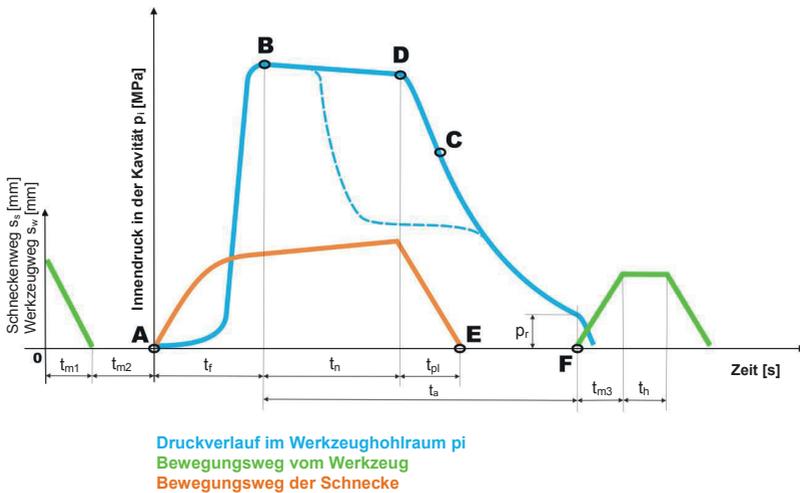


Abb. 3.7 Innendruckverlauf (p_i) in der Kavität während des Spritzgussverfahrens

Am Anfang des Spritzgusszyklus ist das Werkzeug offen und die Kavität leer (siehe Abb. 3.8). Zu Beginn des Vorgangs bekommt die Maschine einen Impuls zum Starten des Spritzgießens. In der Zeit t_{m1} wird der bewegliche Teil des Werkzeugs zum festen Teil bewegt. Das Werkzeug wird damit geschlossen. Wenn die Spritzeinheit der Spritzgießmaschine zum Werkzeug zugeschoben wird, bezeichnet man diese Tätigkeit mit dem Zeitabschnitt t_{m2} . Die Abschnitte t_{m1} und t_{m2} sind die *Maschinenzeiten*. In dem Punkt A kommt die Schnecke im Plastifizierzylinder in Bewegung. Damit beginnt das Spritzen der Schmelze (Füllung) in die Kavität, siehe Abb. 3.9. Diese Zeit der Füllung der Kavität mit Schmelze wird *Füllungszeit* oder *Spritzgießzeit* genannt und mit t_f gekennzeichnet. Der Zeitraum des Spritzgusses

sollte möglichst kurz sein, da die Schmelzfront nicht fest werden darf. Während der Füllphase erreicht der Druck seinen maximalen Wert. Diese Phase wird im Punkt *B* beendet. Das Volumen der Schmelze beträgt etwa 95 % bis 97 % des Hohlraumvolumens des Spritzgießwerkzeuges. Sobald die Schmelze in den Hohlraum der Form fließt, geht die Wärme zum Spritzgießwerkzeug über. Die Kavität kühlt sich ab und die Fließfähigkeit verringert sich. Während dieser Phase dreht sich die Schnecke nicht, sondern bewegt sich nur axial und erfüllt die Funktion des Kolbens.



Abb. 3.8 Ansicht des geöffneten Spritzgießwerkzeuges

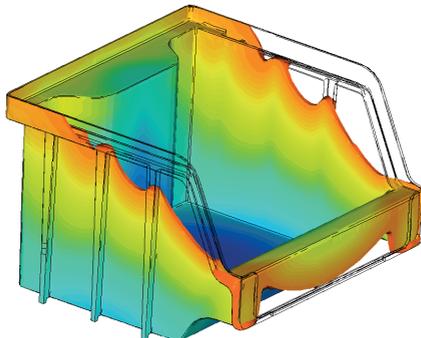


Abb. 3.9 Füllprozess des formgebenden Hohlraums

Das Abkühlen dauert bis zum Öffnen und Ausnehmen (Auswerfen) aus der Spritzgussform. Dieser Zeitraum nennt sich *Abkühlzeit* und wird mit t_a gekennzeichnet. Sie

ist die längste Zeit des Spritzgießens. Während der Abkühlungsphase reduziert sich der Druck in der Gussform bis zum Wert des *Restdrucks* (p_r). Es handelt sich um das Druckniveau, bei welchem sich das Werkstück kurz vor dem Öffnen der Form befindet. Beim Auswerfen des Werkstücks aus der Spritzgussform muss die Temperatur des Werkstücks so hoch sein, dass es zu keiner Deformation des Produkts kommt. Der Abkühlprozess läuft ohne Druck weiter bis die Temperatur des Werkstücks Raumtemperatur angenommen hat. Die Abkühlzeit ist vor allem von der maximalen Wandstärke des Werkstücks (geometrischer Faktor), der Kunststoffart, der Temperatur der Schmelze (T_s), der Werkzeugtemperatur (T_w) und von der Temperatur des Werkstücks in dem Moment des Auswerfens aus der Gussform abhängig. Sie beeinflusst Kristallinität, Glanz, innere Restspannung, Schwindung und Deformationen des Werkstücks.

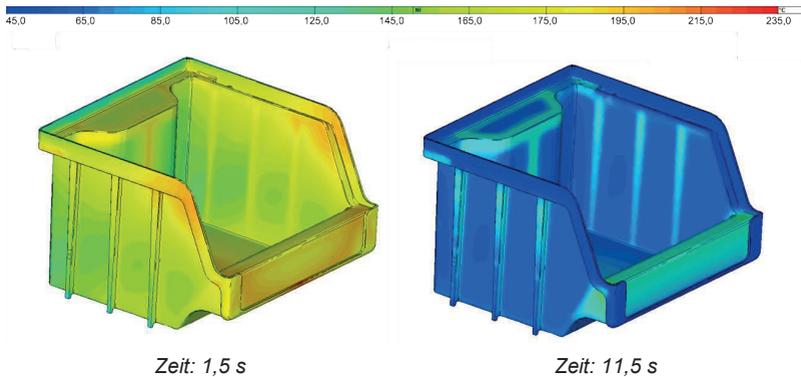


Abb. 3.10 Temperatur des Werkstücks in unterschiedlichen Phasen der Abkühlung

Bei der Kühlung (siehe Abb. 3.10) schwindet die Masse und ihr Volumen wird kleiner. Damit auf der Oberfläche des Werkstücks keine Einfallstellen oder Lunker entstehen, muss die Volumenkontraktion durch Nachdrücken der Schmelze in den Formhohlraum kompensiert werden. Diese Phase wird *Nachdruckzeit* bezeichnet und als t_n gekennzeichnet. Der Nachdruck kann während der ganzen Zeit gleich groß, wie der maximale Druck sein oder kann nach wenigen Sekunden reduziert werden. Die weitere Abkühlung verläuft bei einem kleineren Druck (in der Praxis bevorzugte Variante). Sollte der Druck auf seinem Anfangsniveau bleiben, könnte dies eine kurze Öffnung der Spritzgussform in der Trennebene zur Folge haben, das sog.

Atmen. Deshalb ist es notwendig nach dem Füllen und Drücken der Schmelze in den Formhohlraum den Spritzdruck zu reduzieren, d.h. auf sog. *Nachdruck* umzuschalten (blaue gestrichelte Linie in Abb. 3.7). Zum Nachdruck wird nach Erreichen eines gewissen Schneckenweges, eines gewissen Druckes im hydraulischen System der Spritzgießmaschine oder eines gewissen Druckes in der Werkzeugkavität umgeschaltet. Sie endet im Punkt *D*. Der Punkt *C* kennzeichnet den Moment, in dem die geschmolzene Materialmasse im kalten Angusskanal erstarrt. Zum Nachdrücken muss vor der Schneckenspitze ein bestimmtes Materialvolumen bleiben. Das Restmaterial vor der Schneckenspitze nach dem Nachdrücken wird *Schmelzfront* genannt (siehe Abb. 3.11). Dieses Volumen darf nicht zu groß sein (meistens etwa 5 % bis 15 % des Produktvolumens), so dass es zu keiner thermischen Degradation der Schmelze kommt.

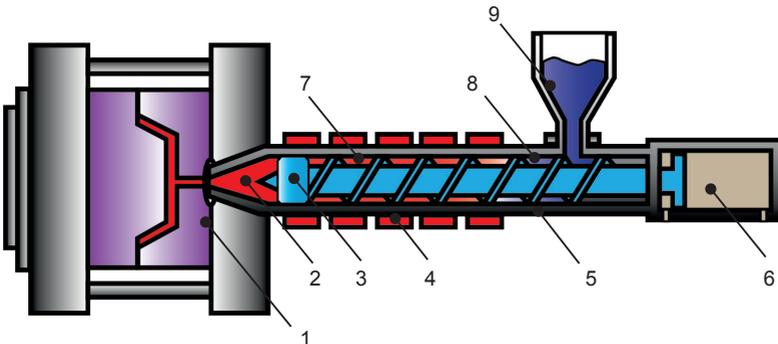


Abb. 3.11 Abbildung der Schmelzfront vor der Schneckenspitze

1 – Spritzgießwerkzeug; 2 – Schmelzfront; 3 – Rückstromsperre;
4 – Heizbänder; 5 – Zylinder; 6 – Systemdruck; 7 – Schmelze;
8 – ungeschmolzene Formmasse; 9 – Granulat

Nach dem Nachdrücken beginnt die Plastifizierung einer neuen Kunststoffmenge für einen weiteren Arbeitszyklus (siehe Abb. 3.12). Die Plastifizierungszeit (t_{pl}) endet im Punkt *E*. Die Schnecke beginnt sich zu drehen, unter dem Fülltrichter sammelt sie das Granulat, welches sie plastifiziert und in den Frontraum vor die Schneckenspitze hineindrückt. Die Schnecke läuft gleichzeitig zurück, wobei sie den sog. *Staudruck* überwinden muss. Die Intensität des Staudrucks beeinflusst die Zeit der Plastifizierung und somit auch die Qualität der Rührung der Schmelze. Ein zu hoher Druck könnte bis zur Degradation des Kunststoffes führen. Die Aufwärmung des Materials

während der Plastifizierung verläuft einerseits über Wärme von den elektrischen Heizbändern, die sich um den Plastifizierzylinder herum befinden, andererseits über Friktionswärme, die durch die Reibung zwischen Kunststoff und den Zylinderwänden, der Schneckenoberfläche, zwischen dem Kunststoffgranulat selbst und durch Umwandlung der Rührarbeit in Wärme entsteht. Das Volumen der plastifizierten Schmelzdosis ist durch die Größe des Gussformhohlraums, durch das Anguss-system und die Materialschwindigkeit bestimmt. Der Dosierhub sollte, in Bezug auf die verwendete Spritzgießmaschine, nicht das Vierfache des Schneckendurchschnitts überschreiten (siehe Abb. 3.13.). Die Plastifizierungszeit hat in der Regel keinen Einfluss auf die gesamte Arbeitszykluszeit, da die Plastifizierungsphase während der Abkühlphase verläuft.

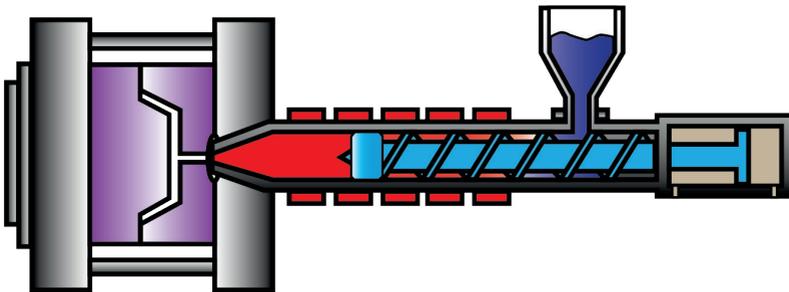
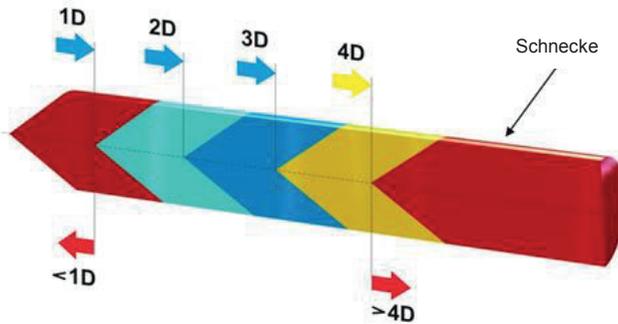


Abb. 3.12 Abbildung der dosierten Schmelze vor der Schneckenspitze nach beendeter Phase der Plastifizierung

In einer weiteren Phase kann die Spritzgussereinheit von der Spritzgussform weg bewegt werden (während der Maschinenzeit), damit eine effektive Kühlung des Werkzeuges erreicht wird. Im Punkt F öffnet sich die Spritzgussform und das Werkstück wird aus dem Werkzeug ausgeworfen (siehe Abb. 3.14). Für diesen Arbeitsschritt ist die *Maschinenzeit* (t_m) notwendig. Wird das Formteil maschinell aus dem Werkzeug entnommen, wird für diesen Schritt noch die *Handlingzeit* (t_h) definiert. Diese ist auch für eventuelle weitere Arbeiten bestimmt, z.B. das Einlegen von Metallstanzeinsätzen in die Gussform oder die Dosierung von Trennmitteln. Die Maschinenzeiten sind von der Geschwindigkeit der Arbeit und Bewegungen der Spritzgießmaschine in Bezug auf den Weg, die das Werkzeug oder Einspritzereinheit zurücklegen muss, abhängig. Heutzutage werden minimale Maschinenzeiten

bestrebt. Modernen Maschinen erzielen das durch erhöhte Geschwindigkeiten und Bewegungen der Spritzgießmaschine sowie durch parallele Bewegungen.



1D bis 3D optimaler Bereich
3D bis 4D möglich in Ausnahmefällen
<1D und > 4D nicht empfohlene Werte

Abb. 3.13 Volumen einer Materialdosis bei Spritzgießmaschinen



Abb. 3.14 Auswerfen des Werkstücks aus dem Werkzeug

Es gibt eine große Anzahl von technologischen Parametern für das Spritzgießen. Zu den wichtigsten technologischen Parametern, die im hohen Maße den eigentlichen Spritzgießprozess und die finalen Eigenschaften des Werkstücks beeinflussen, gehören *Spritzgeschwindigkeit* (v_s), *Spritzdruck* (p_v), *Nachdruck* (p_n), *Nachdruckszeit* (t_n), *Schmelztemperatur* (T_s) und *Werkzeugtemperatur* (T_w). Die empfohlenen Temperaturen der Schmelze und der Form sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tab. 3.1 Empfohlene Schmelz- und Werkzeugtemperaturen bei ausgesuchten Thermoplasten

Thermoplast	Schmelztemperatur [°C]	Werkzeugtemperatur [°C]
PE-HD	180 - 280	30 - 60
PE-LD	170 - 270	20 - 60
PP	180 - 280	20 - 90
PA 6	240 - 280	40 - 100
PA 6.6	260 - 300	60 - 100
PBT	230 - 270	30 - 90
POM	180 - 230	40 - 120
PEEK	380 - 430	160 - 220
ABS	190 - 270	50 - 80
PS	170 - 270	20 - 80
PC	270 - 320	85 - 120
PMMA	200 - 260	30 - 80
SAN	200 - 270	50 - 80
PVC	190 - 220	20 - 70

Für die Montage sind die Abmessungen der Spritzgussteile aus Sicht der Anwendungseigenschaften von Kunststoffteilen sehr wichtig. Sie sind von der Schrumpfung bzw. der Schwindung abhängig. **Schwindung** ist eine volumenbezogene Veränderung des Kunststoffformteils, die von der Abkühlung des Teils - ohne parallelen

Einfluss von Druck - verursacht wird. Die Verarbeitungsschwindung ist wie folgt definiert:

$$s_M = \frac{X_F - X_V}{X_F} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

X_F ... Abmessung der Formhöhlung bei 23 °C in [mm],

X_V ... Produktabmessung bei 23 °C in [mm].

Die im Verlauf von 16 bis 24 Stunden nach Herstellung bei Standardbedingungen gemessene Schwindung wird **Verarbeitungsschwindung** (s_M) genannt. Die Abmessungen der Kunststoffformteile sind innerhalb von 24 Stunden noch nicht stabilisiert. Das Format der Teile kann sich beispielsweise noch durch Spannungsrelaxation oder sekundäre Kristallinität bei teilkristallinen Kunststoffen ändern. Diese zusätzliche Änderung von Abmessungen wird **Nachschwindung** genannt. Die Schwindung ist in Längs- und in Querrichtung (Anisotropie der Eigenschaften) je nach Orientierung der Makromoleküle und Füllstoffe (z. B. Glasfasern) unterschiedlich.

Die Schwindungsgröße wird nicht nur von technologischen Parametern maßgebend beeinflusst, sondern auch vom Polymer (siehe Tab. 3.2), der Angussaufstellung (Anisotropie-Effekt siehe Tab. 3.3) und Konstruktion des Teils (z. B. Wandstärke). Allgemein gilt: je höher die Temperatur der Form, desto größer ist die Verarbeitungsschwindung und kleiner die Nachschwindung. Bei höherem Druck ist die Schwindung dagegen kleiner. Mit steigender Wandstärke wächst auch die Schwindung. Amorphe Kunststoffe haben eine kleinere Schwindung als teilkristalline Kunststoffe.

Tab. 3.2 Größe der Verarbeitungsschwindung bei ausgesuchten Thermoplasten

Thermoplast	Schwindung [%]	Thermoplast	Schwindung [%]
PE-LD	1,5 - 3,0	PA 6	1,0 - 2,5
PE-HD	2,0 - 4,0	PA 6.6	1,0 - 2,0
PP	1,5 - 2,0	POM	1,0 - 3,2
PS	0,2 - 0,5	PC	0,6 - 0,8
ABS	0,4 - 0,7	PBT	1,7 - 2,3
PVC	0,2 - 0,6	PMMA	0,3 - 0,8

Tab. 3.3 Größe der Schwindung für PA 6.6 mit unterschiedlichem Glasfasergehalt

Thermoplast	Längsschwindung [%]	Querschwindung [%]
PA 6.6 + 15 GF	0,55	1,40
PA 6.6 + 25 GF	0,42	1,32
PA 6.6 + 30 GF	0,35	1,25
PA 6.6 + 35 GF	0,32	1,20

3.4

Spritzgießmaschinen

Zum Spritzgießen von Kunststoffen werden hydraulisch, elektrisch oder hybrid betriebene **Spritzgießmaschinen** verwendet. Diese Maschinen haben zwei voneinander unabhängige Einheiten: die *Spritz-* und *Schließeinheit*, die von der *Mikroprozessoreinheit* (je nach Hersteller) gesteuert werden. Beispiele der Spritzgießmaschinen sind in den Abb. 3.15 und Abb. 3.16 gezeigt.



Abb. 3.15 Beispiel einer ENGEL-Spritzgießmaschine

Aufgabe der **Spritzeinheit** (siehe Abb. 3.17) ist die Beförderung, Plastifizierung, Einspritzen und Nachdrücken der Schmelze. Zu den Hauptteilen der Spritzeinheit gehören Plastifizierzylinder, Schnecke (oder Kolben), Düse, Fülltrichter und Heizbän-
de. Die Länge der Schneckenwelle wird nicht in einer Längeneinheit, sondern als das Vielfache des Durchmessers ausgedrückt. Die Länge der Schnecke ist bei den Thermoplastmaschinen meistens 15 D bis 25 D.

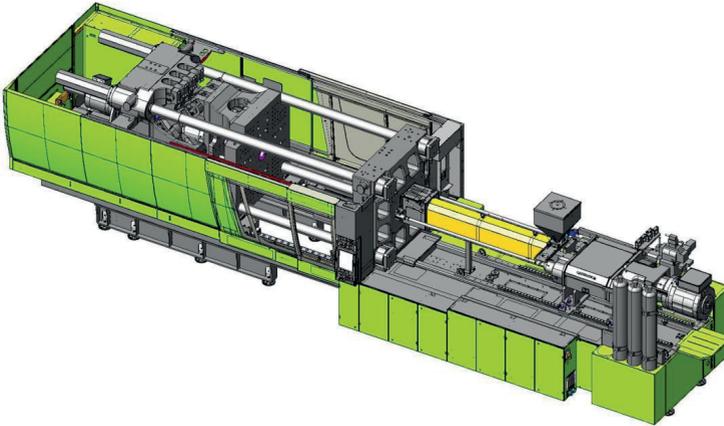


Abb. 3.16 Schema einer elektrisch betriebenen ENGEL-Spritzgießmaschine

Zu den Grundparametern der Spritzeinheit gehört die *Spritzgießkapazität* (Q_s). Sie gibt das maximale Volumen der Schmelze in $[\text{cm}^3]$ an, welches die Maschine maximal in einem Hub (Verschiebung der Schnecke zur Form) in die Kavität einspritzen kann. Der Parameter Q_p steht für die *Plastifizierkapazität*. Er gibt das Maximalgewicht des Kunststoffes, das die Maschine für eine Zeiteinheit $[\text{kg}/\text{Stunde}]$ plastifizieren, also schmelzen und homogenisieren kann, an (sog. Schmelzleistung). Ein weiterer Grundparameter ist das *Kompressionsverhältnis*. Es ist das Verhältnis des Schneckenprofilvolumens der Gewindesteigung unter dem Trichter zu dem Profilvolumen im Teil der Schnecke vor der Düse. Es liegt oft zwischen 1,5 und 4,5.



Abb. 3.17 Beispiel einer Spritzeinheit

Die **Schließeinheit** (siehe Abb. 3.18) ist für das Öffnen und Schließen der Spritzgießform verantwortlich. Des Weiteren „hält“ sie die Form während des Spritzgießens sowie des Nachdrucks im geschlossenen Zustand und ist für das Auswerfen des Werkstücks notwendig. Die Kraft, welche die Form beim Spritzen und Nachdrücken geschlossen hält, nennt sich die Schließkraft (F_u) [kN]. Sie ist das Produkt aus dem Druck und der Projektionsfläche des Werkstücks S (siehe Abb. 3.19) in Richtung der Formhöhlung (p_i) wirkenden Kraft.



Abb. 3.18 Beispiel der Schließeinheit

Die Spritz- und Schließeinheiten stehen zueinander in einer bestimmten Anordnung und Lage. Die gängigste Anordnung ist dabei die horizontale Lage der Spritz- und Schließeinheit. Das Spritzgießen findet senkrecht zur Trennebene des Werkzeuges statt. In einigen Fällen, z.B. beim Einlegen der Formlinge in das Werkzeug, beim Zweikomponentenspritzgießen, kann jedoch die gegenseitige Lage unterschiedlich sein, z.B. der Angusskanal ist direkt in der Werkzeugtrennebene angeordnet.

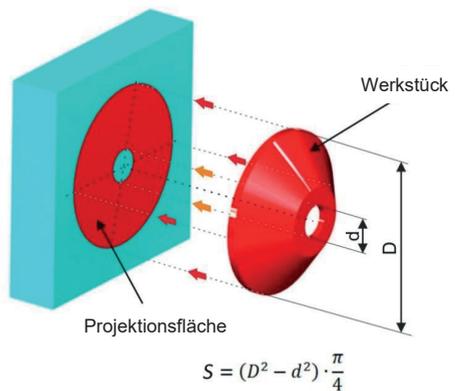


Abb. 3.19 Projektionsfläche des Werkstücks

Die Verarbeitung von Kunststoffen mit dem Spritzgussverfahren findet mit komplexen Werkzeugen, die hohen Drücken und Temperaturen widerstehen, Werkstücke mit exakten Abmessungen gewährleisten und während seiner Lebensdauer funktionieren müssen, statt.

Die **Spritzgießwerkzeuge** unterscheiden sich aus konstruktiven Gesichtspunkten. Sie können in folgende Gruppen aufgeteilt werden:

- je nach Gestaltung gibt es Einfach- oder Mehrfachwerkzeuge (siehe Abb. 3.20),
- je nach Konstruktionslösung und Einformung des Teils gibt es Zweiplatten- (siehe Abb. 3.21), Dreiplatten-, Etagen-, Backen-, Dreh-, Sonderwerkzeuge usw.,
- je nach Konstruktion der Spritzgießmaschine gibt es Werkzeuge mit dem Spritzguss senkrecht zur Trennebene und mit dem Spritzguss in die Trennebene.

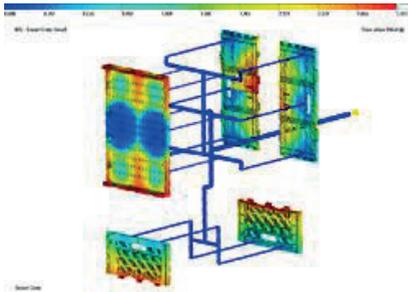


Abb. 3.20 Beispiel eines Mehrfachwerkzeugs, das sog. Family-Werkzeug (verschiedene Geometrien der Formhöhlungen) einschließlich des Werkstücks

Das Spritzgießwerkzeug (siehe Abb. 3.21 und Abb. 3.22) besteht aus Teilen, welche zusammen die Formhohlung des Werkzeugs bilden, dem Angussystem, dem Kühlsystem (Temperiersystem), der Auswerfereinheit, der Entlüftung und den Befestigungs- und Leitungselementen. Einzelteile der Spritzgießwerkzeuge können in zwei Gruppen untergliedert werden – Konstruktionsteile und Funktionsteile. Die Konstruktionsteile stellen die richtige Tätigkeit des Werkzeuges sicher. Dazu gehören hier beispielsweise Platten, Zentrierringe, Abstandshalter, Puffer, Führungsteile usw. Die Funktionsteile sind hingegen im Kontakt mit dem zu verarbeiteten Werkstoff und

erteilen ihm die geforderte Form. Hierzu gehören z.B. Matrize, Kern, Angusskanal usw.

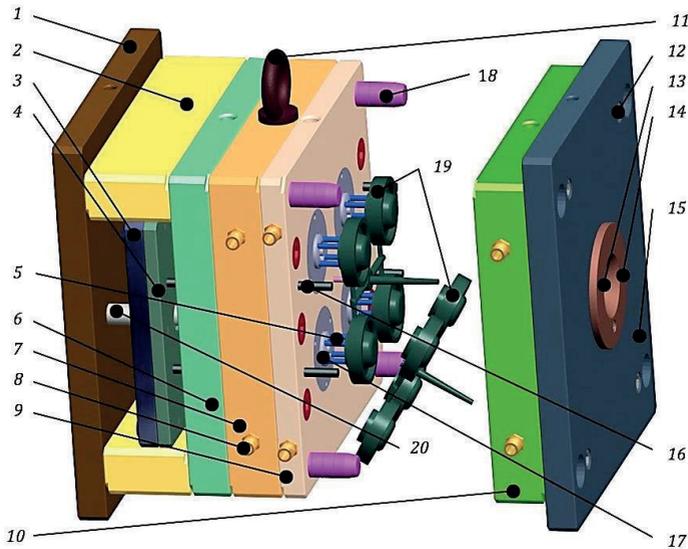


Abb. 3.21 Beispiel einzelner Teile eines Zweiplattenwerkzeugs

(1 – Aufspannplatte; 2 – Aufspannplatte; 3 – Auswerferplatte Auflage; 4 – Auswerferplatte Verankerung; 5 – Auswerfer; 6 – Stützplatte; 7 – Platte für die Kühlungsleitung; 8 – Kühlungsanschluss; 9 – Matrize; 10 – Kern; 11 – Handlingsring; 12 – Hauptmontageschrauben; 13 – Angussbuchse; 14 – Zentrierung; 15 – Aufspannplatte; 16 – Auswerferstifte; 17 – Kern; 18 – Führungselemente; 19 – Spritzteil; 20 – Stützbolzen)

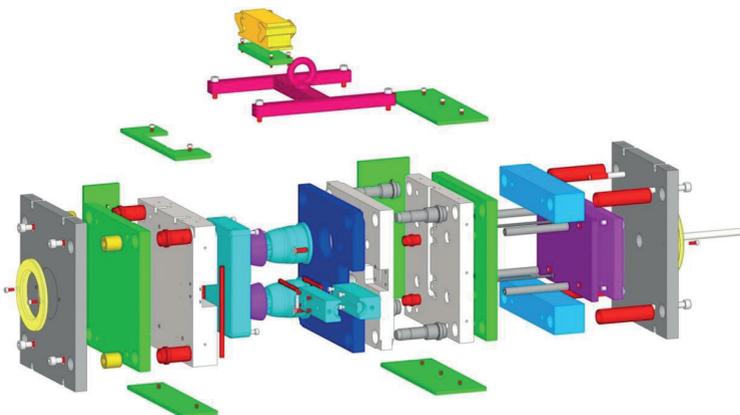


Abb. 3.22 Explosionsdarstellung eines Spritzgießwerkzeugs

Das Angussystem der Spritzgießform ist ein System aus Haupt- und Führungskanälen sowie der Angussbuchsen. Sie stellen die richtige Füllung der Form sicher, ermöglichen ein leichtes Abreißen oder Abtrennen vom Spritzteil und ein leichtes Auswerfen der Angussreste. Das Angussystem wird nach der Anzahl der Formhöhlungen, ihrer Aufstellung, entworfen. Die Anzahl kann auch je nachdem, ob das Werkzeug als eine kalt oder heiß (erwärmte) Verteilung konstruiert wird, variieren (siehe Abb. 3.23).

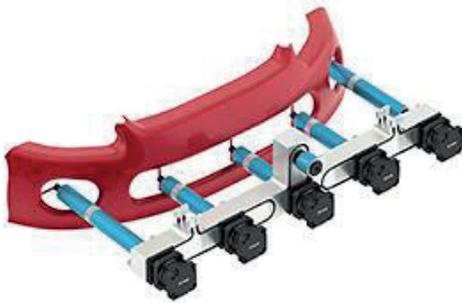


Abb. 3.23 Beispiel eines heißen Kaskaden-spritzgussystems

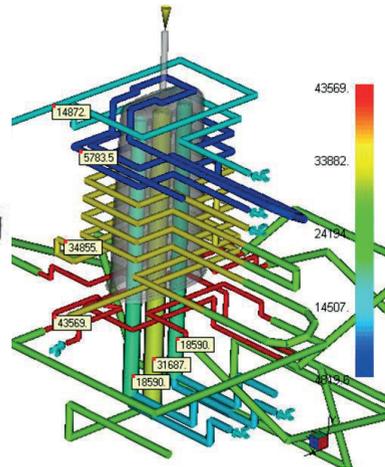


Abb. 3.24 Beispiel eines Temperierungssystems

Unter dem *Temperier-* (*Kühlungs-*) System versteht man ein Kanalsystem (siehe Abb. 3.24), welches das Durchdringen und Weiterleiten von Wärme aus der Schmelze in das Werkzeug und dem Kühlmittel ermöglicht. Das Werkzeug wird mit Hilfe des Temperierungsmediums auf die geforderte Temperatur gehalten. Das Temperier System wird meistens in mehrere Kreisläufe aufgeteilt: einen für den festen und einen für den beweglichen Teil des Werkzeuges. Die Aufstellung der Temperierungskanäle und ihre Abmessungen sind im Rahmen der Gesamtlösung des Werkzeuges und der Werkstückform zu entwerfen.

Die *Auswerfereinheit* (siehe Abb. 3.25) muss ein problemloses Auswerfen (Entformen) des Werkstücks, bzw. des Angussrests aus dem Werkzeug sicherstellen. Das Werkstück darf dabei nicht Deformiert oder Beschädigt werden. Der Entwurf der

Auswerfereinheit ist von der Form des Spritzteils abhängig. Am häufigsten werden Auswerferstifte, -platten, -ringe u.ä. verwendet.

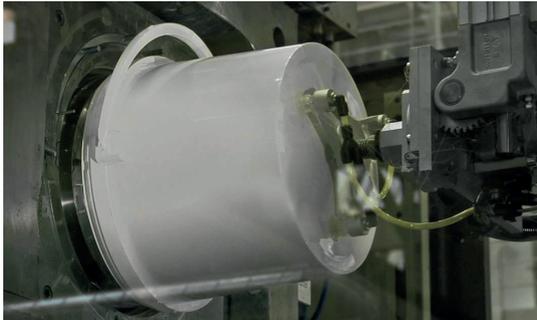


Abb. 3.25 Beispiel einer Auswerfereinheit

Die *Entlüftung* (Luftableitung der Formhohlraum beim Füllungsprozess) ist bei den Spritzgießwerkzeugen sehr wichtig, da es zu einer unvollständigen Füllung der Form mit der Schmelze oder zu Fehlern am Werkstück kommen könnte. Die Entlüftung wird in der Trennebene des Werkzeugs (siehe Abb. 3.26), in den hinteren Positionen des Werkstücks, bei den Führungsteilen usw. entworfen. Eine ausreichende Entlüftung der Form beeinflusst auch die Stellung vom Anguss, die Art der Einförmung des Werkstücks, die Aufstellung der Auswerferstifte, die Anwesenheit der Formeinlegern usw.

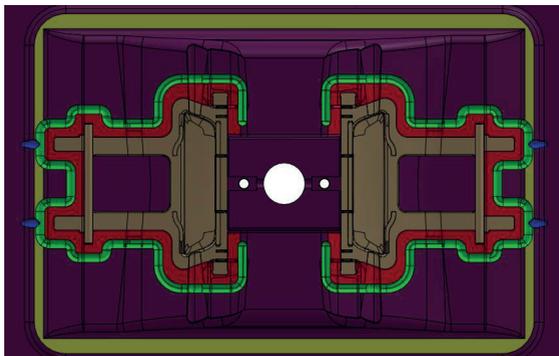


Abb. 3.26 Beispiel der Entlüftung in der Trennebene des Werkzeugs (Blau markiert)

Durch Verwendung **spezieller Spritzgusstechniken** werden die Verarbeitungs- und Anwendungsmöglichkeiten der „konventionellen“ Spritzgusstechnik für Kunststoffe und Composite erweitert. Die Sonderverfahren nutzen das gleiche Verarbeitungsprinzip, unterscheiden sich jedoch in den einzelnen Phasen des Spritzgießens, aus Sicht der technologischen Parameter, der Konstruktion des Spritzgießwerkzeuges oder durch die Anordnung und den Bau der Maschine. Mit den speziellen Spritzgusstechniken werden Teile hergestellt, die z.B. eine spezifische Materialkombination besitzen (siehe Abb. 4.1), aus speziellen Werkstoffen beispielsweise für den Leichtbau bestehen oder geschlossene Innenhöhlungen besitzen.



Abb. 4.1 Beispiele für Kunststoffteile die mit speziellen Spritzgussmethoden hergestellt wurden

4.1

Spritzgießen von Duroplasten

Das Spritzgießen von Thermoplasten ist eine der gängigsten Technologien. Jedoch gewinnt das Spritzgießen von **Duroplasten** immer mehr an Bedeutung. Zurzeit werden ungefähr 25 % bis 35 % der Duroplaste mit Spritzguss verarbeitet. Das Spritzgießen hat im Vergleich zu den früher verwendeten Technologien (Pressen und Transferpressen) folgende Vorteile: die Erwärmung des Materials, Dosierung, Plastifizierung und der Spritzguss werden in einer Spritzeinheit der Maschine durchgeführt, der Prozess kann automatisiert werden, die Aushärtungszeit wird deutlich verkürzt und der technologische Abfall in Form von Angüssen (Angussystem nicht berücksichtigt) ist deutlich geringer.

Der Hauptunterschied zwischen dem Spritzgießen von Thermo- und Duroplasten besteht darin, dass die Abkühlzeit durch die erstarrte Zeit ersetzt ist. Dabei kommt es zur Entstehung einer amorph vernetzten Struktur. Das Spritzgießwerkzeug wird nicht gekühlt, sondern auf die erstarrte Temperatur aufgeheizt (je nach Duroplast im Bereich von 150 °C bis 200 °C). Die Duroplaste werden je nach Typ bei relativ niedrigen Temperaturen (von 45 °C bis 115 °C) plastifiziert (siehe Abb. 4.2).

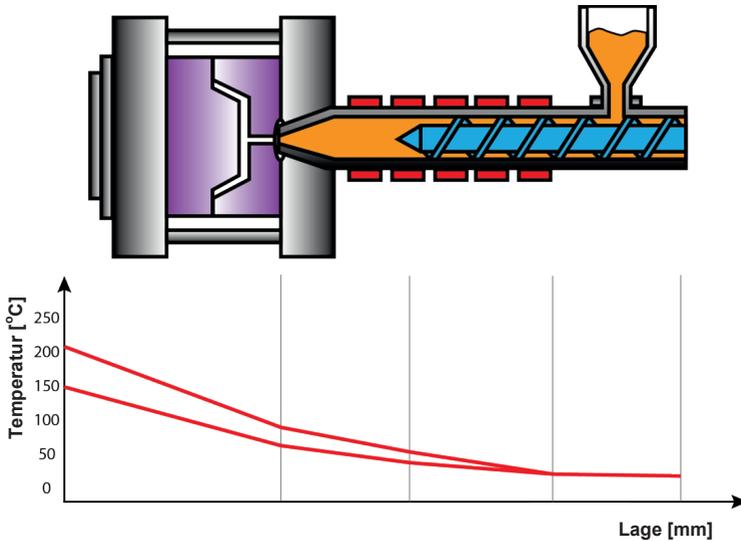


Abb. 4.2 Temperaturen beim Duroplastspritzguss in der Schmelzkammer und in der Form

Die Duroplaste können sich in der Größe der Schwindung, den Zusatzstoffen, der Viskosität (Duroplaste mit besserer Fließfähigkeit brauchen längere Zeit für die Erstarrung) und in der Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur unterscheiden. Beim Spritzguss von Duroplaste ist es sehr wichtig, eine gute Entlüftung des Spritzgießwerkzeuges sicherzustellen. Die Gase, die bei ihrer Verarbeitung entstehen, müssen von der Kavität abgeleitet werden, da sonst Fehler an den Enderzeugnissen entstehen würden. Neben den üblichen Entlüftungskanälen und anderen Entlüftungsmethoden kann eine Entlüftung auch durch ein kurzes Öffnen des Werkzeugs nach der Einspritzphase der Schmelze (das Massenvolumen füllt 80 % bis 95 % des Hohlraums) durch Reduktion der Schließkraft (Öffnung der Form in der

Trennebene um 0,1 mm – 0,2 mm) realisiert werden. Danach folgt das Schließen des Werkzeuges durch die Erhöhung der Schließkraft und das Nachfüllen des Volumens der Höhlung mit der Duroplastschmelze (siehe Abb. 4.3).

Neben den oben genannten technologischen und materialbezogenen Besonderheiten unterscheidet sich das Spritzgießen von Duroplasten auch in der Konstruktion der Maschine und der Schnecke, die die Kompression gering hält, damit es zu keiner großen Scherbelastung des Werkstoffes und somit einer vorzeitigen Aushärtung in der Schmelzkammer kommt. Das L / D Verhältnis der Schnecke bewegt sich im Bereich von 12:1 bis 15:1.

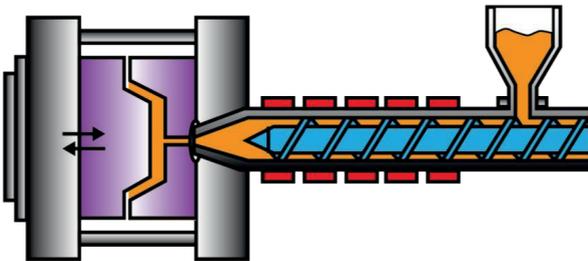


Abb. 4.3 Prozess der Entlüftung des Spritzgießwerkzeuges

4.2

Spritzgießen von Gummi, Kautschuk

Kautschuke und Gummis (Elastomere), können genauso wie Thermo- und Duroplaste, neben anderen technologischen Prozessen auch mit dem Spritzguss in Werkzeugen verarbeitet werden. Die Plastifizierung verläuft ähnlich, wie bei Duroplasten, bei niedrigen Temperaturen. Der Hauptunterschied besteht in dem Ersatz der Abkühlzeit durch die Vulkanisierungszeit, bei der es zur Entstehung einer engmaschig vernetzten amorphen Materialstruktur kommt. Der Arbeitsbereich der Maschine ist, wie bei den Duroplasten, für Elastomere unterschiedlich (siehe Abb. 4.4). Die Schneckenkonstruktion hat entweder übliche Parameter (Kompressionsverhältnis Null) oder besitzt ein Kompressionsverhältnis der Schnecke von ungefähr 1,5:1. Das L / D Verhältnis der Schnecke ist mit ungefähr 14:1 deutlich niedriger als beim Spritzgießen von Thermoplasten. Produktbeispiele sind in Abb. 4.5 angeführt.



Abb. 4.4 Spritzgießmaschine für Elastomere



Abb. 4.5 Beispiele für gespritzte Teile aus Elastomeren

4.3

Spritzgießen von Silikon

In den letzten Jahren stieg der Gebrauch von Silikon dank ihrer Gesundheitsunschädlichkeit, Lebensdauer, der guten Temperaturbeständigkeit insbesondere für die Medizin-, Automobil- und Lebensmittelindustrie (siehe Abb. 4.6). Sie können genauso wie Thermo- und Duroplaste mit dem Spritzguss verarbeitet werden.

Der **Spritzguss von Silikon** (LIM – Liquid Injection Moulding), unterscheidet sich hauptsächlich vom Spritzguss von Thermo- und Duroplasten in der Fließfähigkeit des Eingangswerkstoffes. Silikon wird standardweise in flüssiger Form geliefert. In der ersten Prozessphase wird es aus Fässern verschiedenen Volumens (meist werden 100 l oder auch kleinere Fässer verwendet) in die Plastifizierungseinheit der Maschine dosiert. Dort werden seine beiden Komponenten (Isocyanat und Polyol) vermischt bevor es zum Spritzguss in der Kavität kommt. Silikone werden bei sehr niedrigen Temperaturen (20 °C bis 30 °C) plastifiziert, also bei deutlich niedrigeren

Temperaturen als Thermo- und Duroplaste (siehe Abb. 4.7). Aus technologischer Sicht besteht der Unterschied zum Spritzguss von Thermoplasten bei dem Ersetzen der Kühlungs- mit der Vulkanisierungszeit, bei dem eine vernetzte Struktur hergestellt wird. Die Vulkanisierungstemperatur bewegt sich je nach Silikontyp zwischen 160 °C und 220 °C.



Abb. 4.6 Beispiele für Silikonteile die im Spritzgussverfahren hergestellt werden

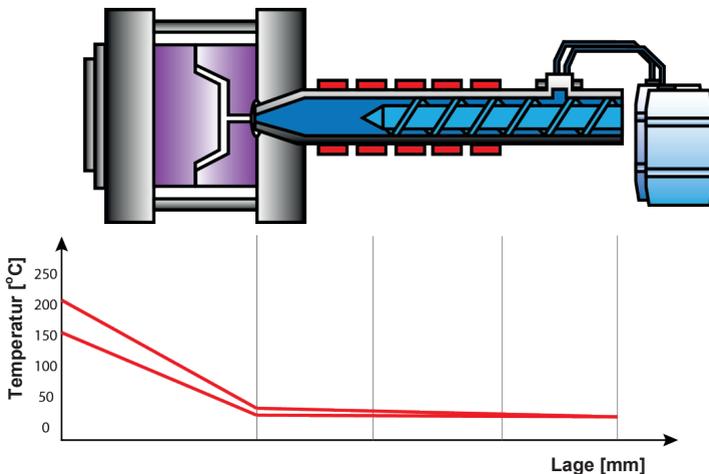


Abb. 4.7 Verarbeitungstemperaturen für den Spritzguss von Silikon

Aus konstruktiver Sicht muss großer Wert auf eine hohe Exaktheit der Trennebene und auf den Entwurf der Spritzgießformentlüftung, wegen der hohen Fließfähigkeit der Silikone, gelegt werden. Sowie bei vorigen Spritzgusstechnologien für Duroplaste

und Elastomere ist im Vergleich zum Spritzgießen von Thermoplaste die Konstruktion der Maschine (siehe Abb. 4.8) und die Konstruktion der Schnecke, die eher als ein Kolben funktioniert, unterschiedlich. Die Maschine hat außer der Spritzgieß- und Schließereinheit auch eine Dosiereinheit und eine andere Düse.



Abb. 4.8 Spritzgießmaschine für den Spritzguss von Silikonen

4.4

Spritzgießen von Glas gefüllten Thermoplasten

Zur Erhöhung der mechanischen Eigenschaften werden in die Kunststoffe *Fasertfüllstoffe* hinzugegeben. Sie können sowohl organischer, als auch anorganischer Herkunft sein. Bei der zurzeit gängigsten Variante handelt es sich um den Zusatz von *Glasfasern*. Andere Füllstoffe können beispielsweise *Kohlenstoff-, Kevlar-, Polyester-, Pflanzen-, Tier- und Metallfasern* sein (siehe Abb. 4.9). Die Faser gefüllten Kunststoffe haben eine höhere Festigkeit, eine gute Maßstabilität und eine niedrigere Schwindung besitzen jedoch eine schlechtere Oberflächenqualität und eine höhere Anisotropie der Eigenschaften in Längs- und Querrichtung.

Zurzeit werden außer den üblich verwendeten kurzen Fasern mit einer Länge von ca. 0,2 mm bis 0,6 mm auch langen Fasern mit einer Länge zwischen 10 mm und 12 mm eingesetzt, siehe Abb. 4.10. Bei der Plastifizierung des Polymers kommt es dabei zum Zerbrecen der Faser auf fast einen Drittel. Das ist jedoch immer noch ungefähr zehnmal länger als die üblich verwendeten kurzen Fasern.

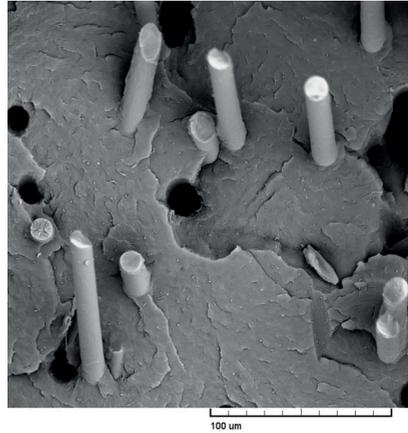
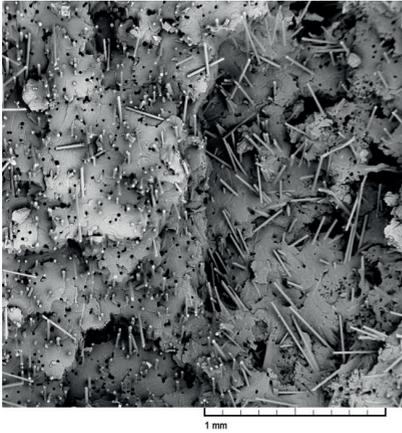


Abb. 4.9 Mikroskopische Abbildung der Bruchfläche eines Verbundwerkstoffes aus PP und Glasfaser



Abb. 4.10 Polymergranulat mit langen Glasfasern (LGF)

(mindesten um 10 °C) kann ein höherer Spritzdruck, -geschwindigkeit und Temperatur des Werkzeuges genutzt werden. Damit kommt es jedoch auch zu einem höheren Verschleiß des Spritzgießwerkzeuges, insbesondere bei der Verwendung von Metall- und Glasfasern.

Der nicht schmelzbare Faseranteil besitzt ein bestimmtes Volumen im Kunststoffteil wodurch seine Schwindung sinkt. Aus technologischer Sicht ist es es aufwendig die Faser in die Richtung der Polymerschmelze zu „ordnen“. Es kann jedoch die Abkühlungszeit in Folge der Volumensenkung der Schmelze gekürzt werden. Mit Rücksicht auf die hohe Viskosität und Temperatur der Schmelze

Die **Gasinjektionstechnik** (GIT – Gas Injection Technology) ist ein Verfahren, das in dem Kunststoffteil gezielt eine geschlossene Höhlung bildet. Dieser Hohlraum wird erzeugt indem an konkrete Stellen des Kunststoffteils ein Inertgas zugeführt wird. Es

wird meistens hochreines Stickstoff (Reinheit mind. 99,8%) im Kompressionsbereich von 10 MPa bis 40 MPa verwendet.

Vorteil der Gasinjektionstechnik ist die Möglichkeit, Kunststoffdickwandteile (siehe Abb. 4.11) mit geschlossenen Höhlungen ohne Einfallstellen herzustellen, die Schließkräfte und Schwindungen zu reduzieren, die Zykluszeit zu verringern (Kürzung der Abkühlzeit um bis zu 50 % dank reduzierter Wandstärke), das Produktgewicht um bis zu 50 % zu reduzieren, die Festigkeit der Teile mit Rippen zu erhöhen, die geforderten mechanischen Eigenschaften des Spritzstücks zu bewahren, die Deformationen zu minimieren, den Kunststoffverbrauch zu verringern und eine hohe Oberflächenqualität der Kunststoffteile zu erzielen. Die Gasinjektionstechnik kann für die meisten Kunststoffe, wie z.B. PE, PP, PS, ABS, PA, SAN, PC, PBT, PC/PBT, TPE aber auch für Fasergefüllte Thermoplaste verwendet werden. Zu den **Nachteilen** der Gasinjektionstechnik gehört der höhere Werkzeugpreis (Anstieg um 70 % – 100 %), ein höherer Maschinenpreis (Anstieg um 30 % – 50 %), die problematische Kühlung im Hohlraum, die Prozesssteuerung, der Gasbedarf und die schlechte Qualität der Oberfläche in den inneren geschlossenen Höhlungen.



Abb. 4.11 Beispiele der Kunststoffteile, die mit GIT hergestellt sind

Die Gasinjektionstechnik arbeitet nach folgenden Verfahren: Formschließen, Einspritzen der Schmelze, Wartezeit, Zufuhr vom Gas, Nachdruck, Abkühlung, Formöffnung und Auswerfen des Produkts. Das Gas bildet in dem Spritzgussteil einen geschlossenen Hohlraum und übernimmt die Nachdruckfunktion.

Gegenüber der klassischen Spritzgießtechnik gibt es hier jedoch einen großen Unterschied zwischen der Viskosität der Schmelze und der des Gases (Entstehung eines unterschiedlichen Strömungstyps). Der Gasdruck ist an allen Stellen der her-

gestellten Höhlung gleich (sowohl beim Gasinjektor, als auch in den hinteren Stellen des geschaffenen Hohlraums). Hohe Spritzdrücke sind nicht wie bei dem konventionellen Spritzgießen notwendig (Reduzierung um 40 % bis 80 %). Vereinfacht dargestellt sind für fließfähigere Kunststoffe ein niedrigerer Druck und umgekehrt notwendig. Ein wichtiger Parameter der Gasinjektionstechnik ist die Wartezeit zwischen dem Spritzguss der Schmelze und der Zufuhr vom Gas. Die Wartezeit ist aus der Sicht der Erhaltung der Oberflächenkompaktheit wichtig, da sonst das Gas auf die Spritzteiloberfläche gelangen würde. Allgemein wird mit steigender Wartezeit auch die Wandstärke des Produktes größer.

Prozessbezogen gibt es zwei technologische Möglichkeiten zur Erschaffung einer geschlossenen Höhlung in den Kunststoffteilen. Die erste Möglichkeit ist ein **kurzer Spritzguss und das Nachblasen**. Bei dieser Methode wird der Hohlraum des Werkzeuges nur teilweise gefüllt (Volumen der Schmelze zwischen 50 % bis 90 %). Nachfolgend wird die Schmelze durch den Gasdruck in die hinteren Stellen des Spritzteils gefüllt. (siehe Abb. 4.12). Das größte Problem ist die Wahl der Dosis: bei kleinem Volumen der Schmelze kommt es zum Durchstoßen der Produktwand mit dem Gas, bei großer Schmelzdosis kann die innere geschlossene Höhlung in der ganzen Produktlänge nicht erzielt werden. Die Wandstärke wird mit der Entfernung der Gasspritzstelle reduziert.



Abb. 4.12 Spritzgießverfahren bei der GIT Technik – kurzer Spritzguss

Die zweite Möglichkeit ist ein **langer Spritzguss und die Ausblasmethode**. Es handelt sich um eine technologische Methode, bei der die Schmelze die Kavität ganz

füllt und Gas unter Druck in den Formhohlraum eingespritzt wird. (siehe Abb. 4.13). Die Schmelze wird während der Schaffung des Hohlraums entweder in eine Nebenkavität ausgeblasen (siehe Abb. 4.13) oder vor die Schneckenspitze zurückgeblasen (in diesem Fall muss die Spritzdüse aufgeheizt werden). Beim langen Spritzguss ist die Wandstärke entlang der ganzen Höhlung gleichmäßiger.

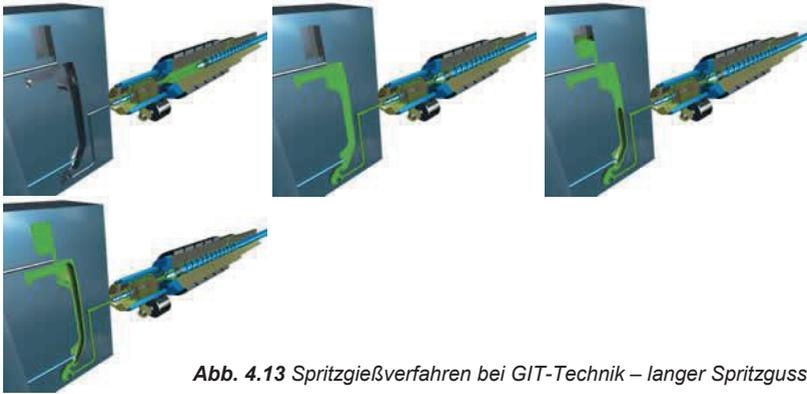


Abb. 4.13 Spritzgießverfahren bei GIT-Technik – langer Spritzguss

Es gibt zwei Möglichkeiten der Gaszufuhr zur Schaffung der geschlossenen Höhlung: mit der *Düse* der Maschine und mit dem *Injektor* (Nadeldurchmesser 3 mm bis 5 mm). Beim Injektor besteht die Gefahr der Nadelverstopfung mit Rückständen der Schmelze beim Rückaufsaugen des Gases. Die Gasdruckkontrolle wird von der Druckeinheit durchgeführt, die gewöhnlich Bestandteil der Spritzgießmaschine ist.

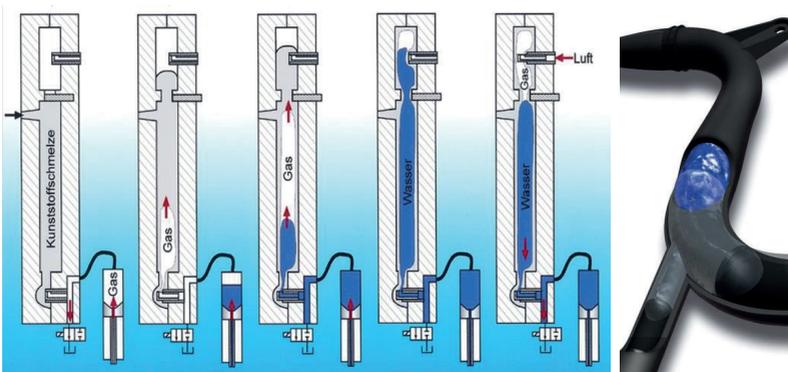


Abb. 4.14 Prinzip der Technologie mit ergänzender „Durchspülung“

Bei der Gasinjektionstechnik gibt es mehrere Alternativen, die „Mängel“ der Technologie zu beseitigen. So werden z.B. die hohen Temperaturen in den erzeugten Hohlräumen (Gas wird aufgeheizt und wird Bestandteil der Höhlung) technologisch beseitigt, in dem die Höhlungen entweder mit kalter Luft oder kaltem Wasser durchgespült werden (siehe Abb. 4.14).

4.6

Wasserinjektionstechnik

Neben der Gasinjektionstechnik wird auch die **Wasserinjektionstechnik** (WIT – Water Injection Technology) verwendet. Dabei wird nicht Gas, sondern Wasser zur Schaffung einer geschlossenen Höhlung genutzt. Das Wasser wird, genauso wie auch Gas, zum Formen einer Höhlung in die flüssige Schmelze eingefüllt. Es sollte bei dem Prozess nicht verdunsten, was nicht nur von der Temperatur der Schmelze, sondern auch vom Druck, mit dem das Wasser in die Schmelze eingespritzt wird, abhängig ist. Die Injektion des Wassers muss schnell genug durchgeführt werden, damit eine hydrolytische Zersetzung vom Kunststoff verhindert wird. Die Wasserfront wirkt auf den plastischen Kern wie ein Kolben.

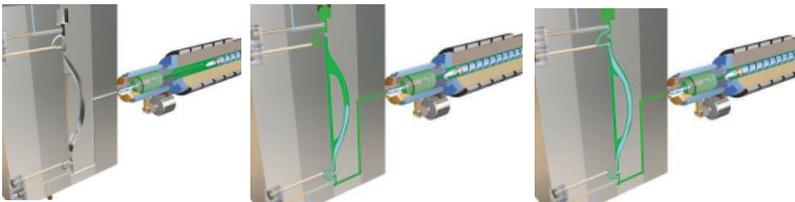


Abb. 4.15 Prinzip der WIT Technik – langer Spritzguss

Der Herstellungsprozess und die technologischen Prinzipien der Wasserinjektionstechnik (siehe Abb. 4.15) sind ähnlich der Gasinjektionstechnik. Das Wasser übernimmt, genauso wie Gas, die Nachdrucksfunktion. Der Wasserdruck ist an allen Stellen der geschaffenen Höhlung gleich. Der Druck ist dabei fortschreitend steigend. Nach kompletter Füllung der Kavität wird der Druck erhöht, sodass die exakte Form des Werkstücks erzielt wird. Genauso wie beim Gas ist auch beim Wasser die Wartezeit zwischen dem Spritzguss der Schmelze und der Wasserzufuhr aus der Sicht der Wandstärke vom Spritzteil sehr wichtig (siehe Abb. 4.16). Am Ende kann

das Wasser mit Druckluft ausgedrückt werden, abgesaugt oder in eine Nebenkavität abgeführt werden.

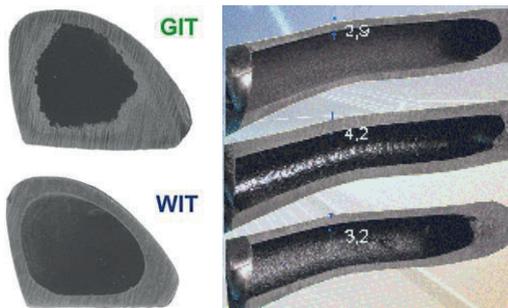


Abb. 4.16 Vergleich von GIT und WIT aus Sicht der Oberflächenqualität der Höhlung (links) und aus der Sicht der Wandstärke (rechts – WIT oben, GIT in der Mitte und GIT/WIT unten)

Vorteile der Wasserinjektionstechnik sind die Möglichkeit dickwandige Kunststoffteile herzustellen (siehe Abb. 4.16), die Schließkräfte und Schwindung zu reduzieren, die Zykluszeit zu kürzen (Abkühlzeit im Vergleich zu Gas um 70 % bis 90 % kürzer dank eines größeren Kühleffekts von Wasser), das Produktgewicht zu reduzieren, die Deformation der Kunststoffprodukte zu verringern, den Kunststoffverbrauch zu reduzieren und eine hohe Oberflächenqualität der äußeren und inneren Wand der Werkstücke zu erzielen (siehe Abb. 4.16). **Nachteil** der Wasserinjektionstechnik ist der höhere Preis der Werkzeuge (Anstieg um 80 % bis 100 %), ein höherer Preis der Maschine (Anstieg um 30 % bis 50 %), die Prozesssteuerung, der Bedarf an ergänzenden Anlagen und eine beschränkte Anwendbarkeit.

4.7

Sandwich-Spritzgießverfahren

Das **Sandwich-Spritzgießverfahren** ist ein Verfahren, bei dem ein Produkt aus zwei gleichen oder unterschiedlichen Kunststoffen hergestellt wird. Ein Kunststoff auf der Oberfläche des Werkstücks bildet eine „Schale“, „Oberfläche“ oder „Haut“, der andere Kunststoff im Werkstück bildet den „Kern“ (siehe Abb. 4.17). Vorteil dieser Technik ist, dass ein wiederverwertetes Material für den Kern und spezielle Kunststofftypen nur auf der Oberfläche der Produkte (leitfähige Kunststoffe, high-tech Kunststoffe, Nanokomposite usw.) verwendet werden können. Der Kunststoff auf der Oberfläche des Werkstücks kann, muss sich aber nicht von dem Kunststoff im Kern

unterscheiden. Beide Werkstoffe sollten jedoch ähnliche Eigenschaften und Verarbeitungsparameter wie z.B. die Temperatur der Schmelze haben. Die finale Aufteilung der Komponenten in dem Produkt ist vor allem von den Fließeigenschaften der Werkstoffe, der Geometrie des Produkts und der Positionierung des Angussystems abhängig.

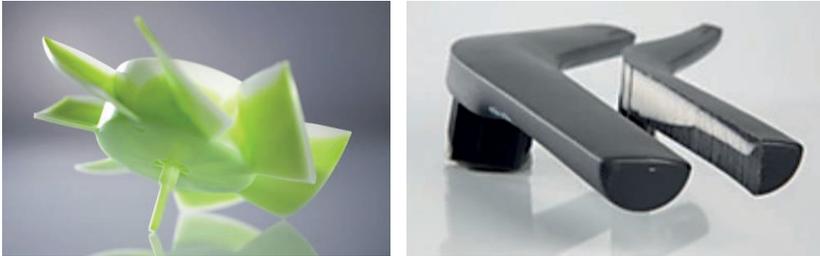


Abb. 4.17 Beispiele von Kunststoffteilen, die mit dem Sandwich-Spritzgießverfahren hergestellt werden

Das technologische Verfahren läuft wie folgt ab: Werkzeug schließen, Einspritzen der exakt definierten Dosis der Schmelze, welche die Oberflächenschicht des Werkstücks bildet, einspritzen der Schmelze die den Produktkern bildet, Nachdruck und Abkühlung. Soll die Oberfläche des Teils kompakt sein, wird schließlich noch Schmelze eingespritzt, welche die Oberfläche des Teils bildet (Dreiphasenprozess, siehe Abb. 4.18). Es folgt die Öffnung der Form und das Auswerfen vom Enderzeugnis.

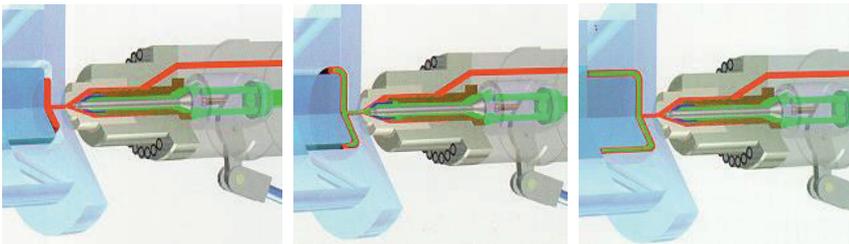


Abb. 4.18 Prinzip des Sandwich-Spritzgießverfahrens

Für die einzelnen Phasen des Spritzgusses ist der richtige Umschaltmoment der Füllung der Kavität mit der Schmelze für die Oberfläche und den Kern zu finden. Während der Füllung bewegt sich die Oberflächenschicht vom Werkstoff (gefrorene Schicht). Nach der Abkühlung ist das nicht mehr möglich. Die Verschiebung der Schmelze ist nur dort möglich, wo sie noch nicht erstarrt ist. Dadurch kommt es zur Füllung der Kavität in der gesamten Oberfläche des Produkts. Nach der Einspritzphase sind die Schmelzen beider Werkstoffe für die Nachdrucksphase immer noch ausreichend plastisch.

Bei dem Sandwich-Spritzgießverfahren werden Maschinen mit zwei Spritzeinheiten verwendet (siehe Abb. 4.19). Der Spritzgießprozess wird mit einer speziellen Spritzdüse gesteuert, die beide Spritzeinheiten verbindet und die Schmelze in die Höhlung der Spritzgießform mit Hilfe von Zwang- (hydraulischen) oder druckgesteuerten Mechanismen dosiert, die den Dorn in Abhängigkeit der Druckverhältnisse steuert.



Abb. 4.19 Beispiel der Maschine für das Sandwich-Spritzgießverfahren

4.8

Mehrkomponentenspritzgießen

Das **Mehrkomponenten-** oder **Mehrfarbspritzgießen** ermöglicht es ein Werkstück mit zwei oder mehreren Polymerwerkstoffen oder mehreren Farben eines Werkstoffes zu kombinieren (siehe Abb. 4.20). Der technologische Prozess besteht entweder in der Erzeugung einer Verbindung zwischen den verwendeten Polymeren mit Adhäsionsbindungen (siehe Tab. 4.1) oder durch Überspritzen der Formgeometrie bei Polymeren ohne gegenseitige adhäsive Bindungen (nicht mischbare Polyme-

re, siehe Abb. 4.21). Zurzeit wird diese Technologie zunehmend mehr für Produkte verwendet, die aus einer Kombination von Thermoplast und thermoplastischen Elastomer bestehen. Sie können durch diese Materialkombination beispielsweise die Vibration des Teils eliminieren oder eine Dichtungsfunktion erfüllen.



Abb. 4.20 Beispiele für Kunststoffteile, die mit Mehrkomponenten- oder Mehrfarbenspritzguss hergestellt wurden



Abb. 4.21 Beispiele für Kunststoffteile, die durch Mehrkomponentenspritzguss mit einer adhäsiven Verbindung (links) und durch Überspritzen (rechts) hergestellt wurden

Das Mehrkomponentenspritzgießen unterscheidet sich vom konventionellen Spritzgießen in der Mehrphasen- und Mehrlagenherstellung des Produkts: in der ersten Phase wird das erste Material (oder die erste Farbe) eingespritzt. In der weiteren Phase wird nach Umsetzung des Vorspritzlings in eine andere Position, das weitere (zweite, dritte usw.) Material eingespritzt und das Teil damit komplettiert. Bei Verwendung von zwei Werkstoffen handelt es sich um Zweikomponentenspritzgießen (2K), bei drei Werkstoffen um Dreikomponentenspritzgießen (3K) und von vier Werkstoffen um Vierkomponentenspritzgießen (4K).

Tab. 4.1 Gegenseitige Bindung (Adhäsion) der ausgesuchten Polymertypen

	ABS	ASA	PA 6	PA 6.6	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	POM	PP	PBT	PC/ABS
ABS	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion			Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion		Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion
ASA	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion			Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion		Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion
PA 6			Gute Adhäsion	Gute Adhäsion		Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion		
PA 6.6			Gute Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion		
PC	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion		Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion
PE-HD	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion				
PE-LD	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion				
PMMA	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion				Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion		Schwache Adhäsion		
POM						Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion		
PP	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion				
PBT	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion			Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion	Gute Adhäsion	
PC/ABS	Gute Adhäsion	Gute Adhäsion			Gute Adhäsion	Schwache Adhäsion	Schwache Adhäsion			Schwache Adhäsion		Gute Adhäsion

Gute Adhäsion
 Geometrische Verbindung (ohne Adhäsion)
 Schwache Adhäsion

Die am meisten verwendete und gleichzeitig billigste Variante ist das *Zweikomponentenspritzgießen*. Das Verfahren läuft wie folgt ab: Werkzeugschließen, Einspritzen vom ersten Polymer in eine Kavität und gleichzeitig Einspritzen des zweiten Polymers in die zweite Kavität des Werkzeuges, wo es zur Verbindung kommt und das Enderzeugnis hergestellt wird. Nach der Nachdruckphase und Abkühlung wird das Werkzeug geöffnet und das Enderzeugnis aus der zweiten Kavität ausgeworfen. Gleichzeitig wird der Vorspritzling von der ersten in die zweite Kavität umgesetzt. Die Anzahl der Öffnungen der Spritzgießform ist von der Anzahl der Höhlungen abhängig.

Zur **Umsetzung der Vorspritzlinge** in eine andere Kavität sind während des Spritzvorgangs folgende technologische Möglichkeiten üblich:

- Drehung einer Werkzeughälfte um die horizontale Achse,
- Drehung einer Werkzeughälfte um die vertikale Achse,
- Drehung eines Werkzeugteils um die horizontale Achse (System der Indexplatte),
- Verwendung des beweglichen Werkzeugteils,

- Roboteranwendung.

Bei der **Drehung des Spritzgießwerkzeuges um die horizontale Achse** dreht sich eine Hälfte des Werkzeugs zu definierten technologischen Zeiten zu den einzelnen Spritzeinheiten (siehe Abb. 4.22). Nach dem ersten Spritzvorgang, Nachdruck und Abkühlung wird das Werkzeug geöffnet, der Anguss ausgeworfen und das Werkzeug zusammen mit dem Vorspritzling zur weiteren Spritzeinheit gedreht. Das Werkzeug wird wieder geschlossen und der Vorspritzling mit einem weiteren Kunststoff in seine Finalform überspritzt. Die Rotationsbewegungen können entweder alternierend (Zweilagenspritzgießwerkzeug) oder kontinuierlich (Dreilagenspritzgießwerkzeug) sein.

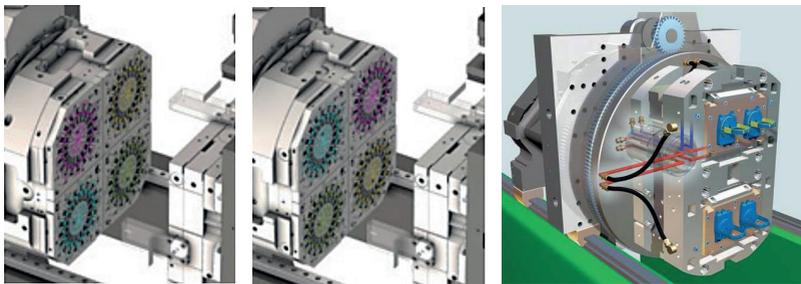


Abb. 4.22 Prinzip der Umsetzung des Vorspritzlings durch die Drehung des Spritzgießwerkzeuges um die horizontale Achse

Bei der **Drehung des Spritzgießwerkzeuges um seine vertikale Achse** wird die mittlere Platte in Richtung der zweiten Werkzeughälfte gedreht (siehe Abb. 4.23). Für eine reibungslose Drehung muss die Größe der Öffnung des Spritzgießwerkzeuges dimensioniert werden. Die Spritzeinheiten spritzen gegeneinander und werden nur durch eine Drehplatte voneinander getrennt. Die Schmelzen wirken gegeneinander wodurch die Schließkräfte reduziert werden.

Wenn nur **ein Teil des Spritzgießwerkzeuges um die horizontale Achse rotiert**, dreht sich nur die bewegliche Hälfte des Spritzgießwerkzeuges, die sog. Indexplatte (siehe Abb. 4.24). Das Prinzip und die Steuerung sind identisch mit der Variante, der Rotation des Spritzgießwerkzeuges um die horizontale Achse.

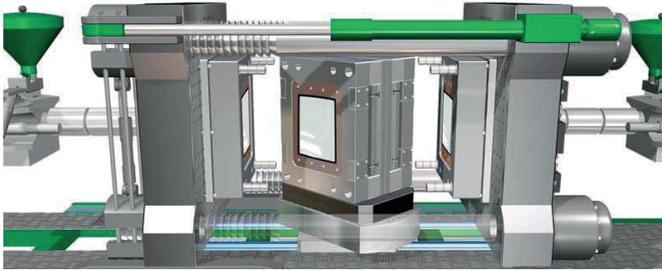


Abb. 4.23 Umsetzen der Vorspritzlinge mit Drehung des Werkzeuges um die vertikale Achse

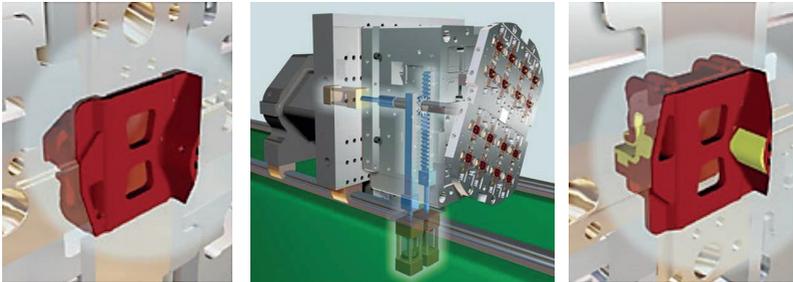


Abb. 4.24 Prinzip der Drehung von nur einem Teil der Form - Indexplattensystem

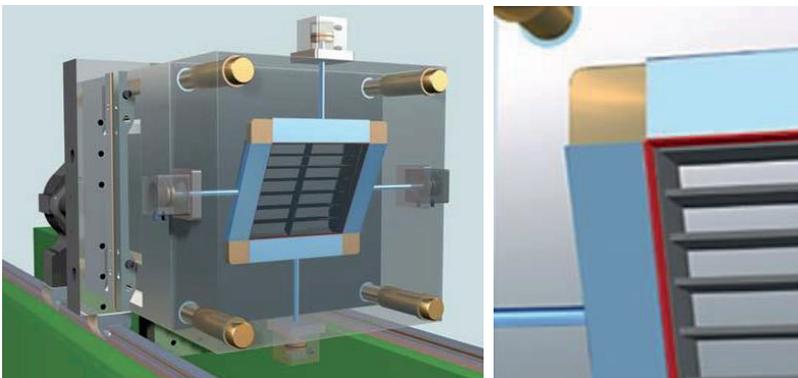


Abb. 4.25 Prinzip der Verwendung von verschiebbaren Teilen in der Spritzgießform

Verschiebbare Teile eines Spritzgießwerkzeuges – der Formenkerne (siehe Abb. 4.25) werden vor allem beim lokalen Bespritzen mit einem zweiten Kunststoff oder einen weichen (z.B. thermoplastische Elastomere oder Silikon) auf einen harten Kunststoff (Thermoplast) verwendet. Der bewegliche Formteil des Spritzgießwerkzeuges schließt oder öffnet den Teil des Formhohlraums, der mit der Schmelze gefüllt werden soll. Als Nachteil ergibt sich manchmal ein längerer Spritzgusszyklus, da einzelne Komponenten nacheinander und nicht gleichzeitig eingespritzt werden.

Die Verwendung von **Robotern** (siehe Abb. 4.26) wird vor allem bei größeren Kunststoffteilen oder bei Bauteilen, die an zwei Maschinen gespritzt werden, eingesetzt. Durch den Einsatz von Robotern findet für gewöhnlich eine Verlängerung der gesamten Zykluszeit in Folge der längeren, zur Umsetzung der Vorspritzlinge notwendigen Zeit, statt. Auf der anderen Seite ist dieses Verfahren eine der am häufigsten gebrauchten Arten zur Umsetzung von Produkten von einer Position zur anderen.

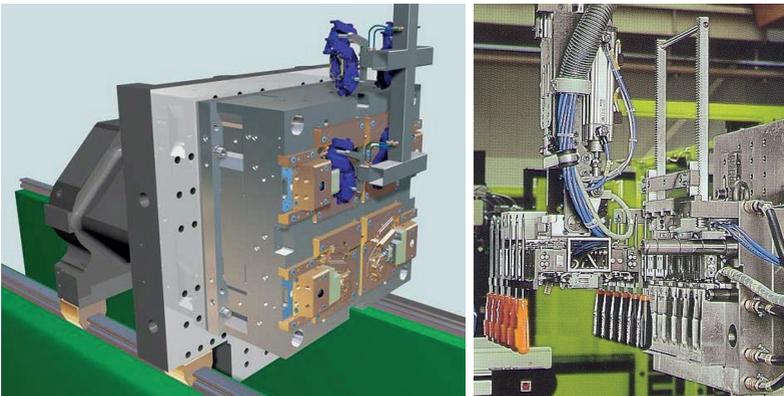


Abb. 4.26 Umsetzung der Kunststoffteile zwischen den Kavitäten

Aus Sicht der Maschinen und Werkzeuge unterscheidet sich das Mehrkomponentenspritzgießen von dem konventionellen Spritzguss in den Anforderungen bei der Kombination von Kunststoffen. Das Werkzeug muss bei einem Spritzgießzyklus den Spritzguss von verschiedenen Kunststoffen oder Farben in einzelnen Werkzeugkavitäten ermöglichen. Weiterhin sind mehrere Spritzeinheiten an das Werkzeug ange-

geschlossen (siehe Abb. 4.27). Die Spritzeinheiten haben voneinander unabhängig einstellbare Heizungen, Dosiereinheiten und auch technologische Parameter. Die Positionierung der Spritzeinheiten ist je nach Art und Anzahl der Komponenten konstruktiv unterschiedlich. Beispiele sind in Abb. 4.27 abgebildet.

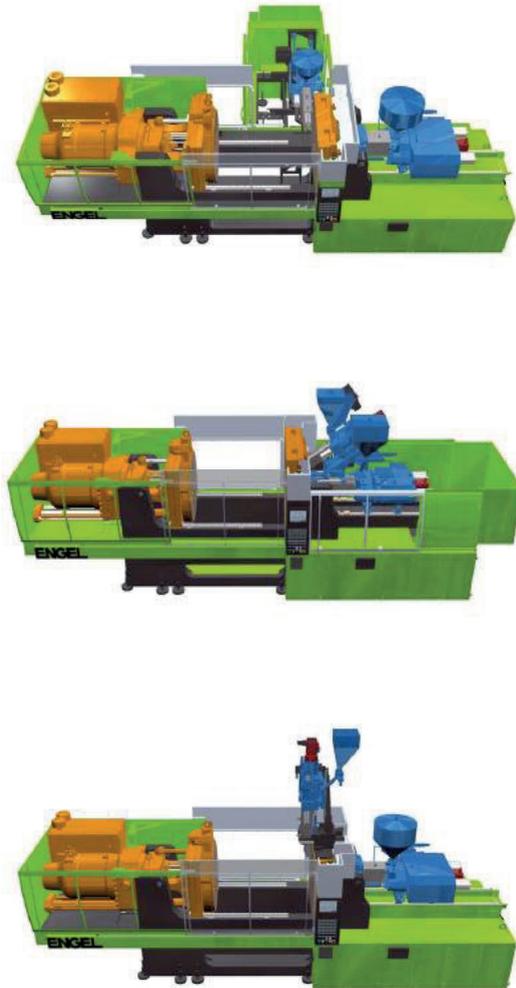


Abb. 4.27 Beispiele der Anordnung von Spritzeinheiten beim Mehrkomponenten- oder Mehrfarbenspritzgießen

Ein Sonderfall beim Mehrfarbenspritzgießen ist das **Intervall-Spritzgießen**. Das Prinzip dieser Technologie besteht in der Durchmischung von mehreren Farben eines Polymers in einer speziellen Mischdüse. Das findet vor der eigentlichen Füllung der Werkzeugkavität mit Schmelze statt. Die Spritzeinheiten münden nicht direkt in das Werkzeug, sondern in eine zusätzliche Intervall-Einheit, in der sich die spezielle Mischdüse befindet und von der die Schmelze in die Werkstoffkavität eingespritzt wird. Im Vergleich zum Mehrfarbenspritzgießen sind an den Werkstücken keine klaren und scharfen Abgrenzungen zwischen den Farben erkennbar. Der Effekt an dem Produkt (siehe Abb. 4.28) ist von der Einstellung der Farbmischung, Konstruktion des Teils, Aufstellung des Angussystems und von den Fließeigenschaften der Schmelze abhängig.



Abb. 4.28 Beispiele für Produkte die durch Intervall-Spritzgießen hergestellt wurden

Marmorierung ähnelt dem Intervall-Spritzgießen. Hier kommt es zu einer ungleichmäßigen und inhomogenen Mischung von unterschiedlichen Farben eines Kunststoffes. Wegen der Inhomogenität der Schmelze entstehen auf dem Produkt unterschiedlich intensive Farbbereiche, die keine klare Abgrenzung und keine einheitliche Intensität haben. Der Hauptunterschied zu dem konventionellen Spritzgießen besteht in der Konstruktion des Arbeitselements, welches die Polymerplastifizierung in der Schmelzkammer durchführt. Anstelle der Schnecke wird bei der Marmorierung ein spezielles Rührelement verwendet (siehe Abb. 4.29). Das hat teilweise die Form eines Kolbens, teilweise die Form einer Schnecke. Infolgedessen kommt es

so zu keiner intensiven Rührung und Scherbelastung des Kunststoffes und die Farböne werden in Richtung der Verschiebung der Polymerschmelze orientiert.

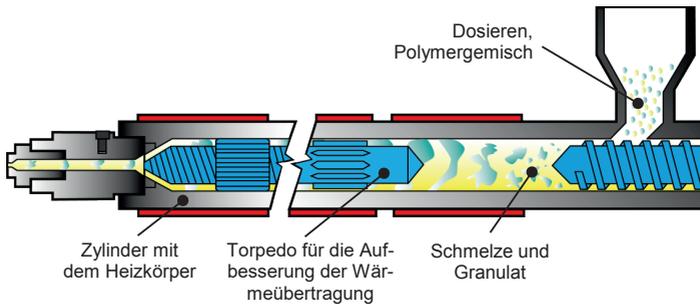


Abb. 4.29 Konstruktion der Spritzeinheit zur Marmorierung

4.11

Pulver-Spritzguss-Verfahren

Das **Pulver-Spritzguss-Verfahren** (PIM - Powder Injection Moulding) ist ein Verfahren, bei dem das Polymer als Bindemittel verwendet wird. Träger für Pulver unterschiedlicher Werkstoffe sind beispielsweise auf Basis von Metallen (z.B. Hartmetalle, Stahl, Karbide), Nichteisenmetalle (z.B. Kupfer), Glas, Keramik, usw. Der Kunststoffinhalt im Granulat bewegt sich im Bereich von 35 % bis 50 %. Aus Sicht der verwendeten Pulvertypen gibt es bei dieser Technologie zwei Arten, die eigene Kennzeichnungen besitzen: MIM (Metal Injection Moulding) und CIM (Ceramic Injection Moulding). Typ, Form und Größe des verwendeten Pulvers haben einen großen Einfluss auf den Prozess und die Qualität des Enderzeugnisses, insbesondere seiner Schwindung (Pulver mit unregelmäßiger Form haben eine höhere Anisotropie in der Schwindung.)

Mit dem PIM Verfahren werden beispielsweise Teile für die Automobil- und Textilindustrie, Elektrotechnik, Gesundheitswesen und Waffenindustrie hergestellt (siehe Abb. 4.30). Die Enderzeugnisse haben eine ausgezeichnete Qualität und eine hohe Exaktheit hinsichtlich ihrer Abmessungen. Gegenüber der üblichen Spritzgießtechnik ist der Preis des Werkzeugs um 50 % bis 80 % höher. Die Maschinen- und Anlagekosten betragen ca. das Doppelte.



Abb. 4.30 Beispiele für Teile die mit dem Pulver-Spritzguss-Verfahren hergestellte wurden

Das Prinzip des Pulver-Spritzguss-Verfahrens ist folgendes: Werkzeugschließen, Spritzguss der Schmelze mit Pulver in den Werkzeughohlraum (Ergebnis ist das sog. „grüne“ Produkt, siehe Abb. 4.31), Nachdruck, der niedriger als beim konventionellen Spritzguss ist, Plastifizierung der neuen Dosis, Abkühlung, Auswerfen des Produktes aus der Form und die Beseitigung von Kunststoff (Ergebnis ist das sog. „braune“ Produkt). Die Endphase ist das Sintern. Infolge des hohen Pulveranteils in der Mischung sinkt die Fließfähigkeit der Schmelze deutlich. Daher ist die Verwendung eines hohen Spritzdruckes und einer hohen Spritztemperatur erwünscht.

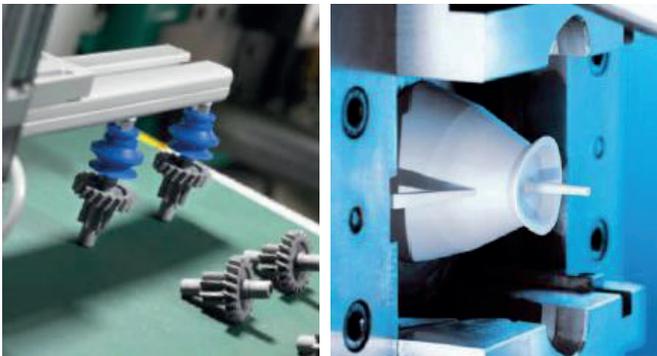
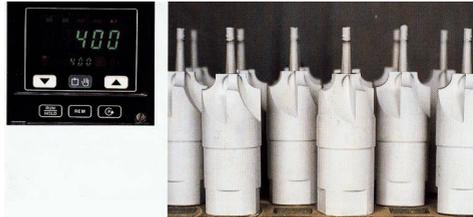


Abb. 4.31 Beispiele von „grünen“ Teilen nach dem Spritzgießen

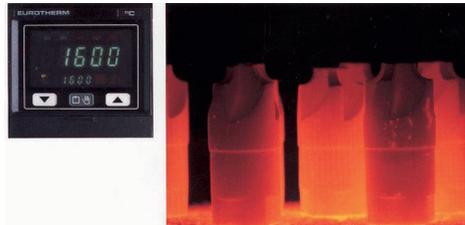
Die Beseitigung des Polymers kann mit verschiedenen Methoden, z.B. durch Brennen im Ofen bei ca. 400 °C bis 450 °C (siehe Abb. 4.32) oder durch den katalytischen, thermisch-chemischen Prozess, durchgeführt werden.

Abb. 4.32 Das „braune“ Produkt nach dem thermischen Entfernen von Kunststoff



Die Sinterung (siehe Abb. 4.43) vom Metall- oder Keramikpulver verläuft im Ofen, je nach verwendetem Pulver, bei Temperaturen bis 2 000 °C. Die Enderzeugnisse sind homogen und weisen eine Schwindung auf, die deutlich höher als beim üblichen Spritzgießen ist (rund zehn Prozent). Die Größe der Schwindung ist von dem verwendeten Polymer, Pulver und Polymerinhalt abhängig.

Abb. 4.33 Sinterungsprozess



4.12

Spritzgießen von Metall-Legierungen

Das **Spritzgießen von Metall-Legierungen**, amorphen Zirkonium-Legierungen (Liquidmetall), ist die Alternative für das PIM-Verfahren. Mit dem Spritzgießen werden Metallteile von hoher Qualität (siehe Abb. 4.34) bis zu einem Gewicht von ca. 100 g (einschließlich Einguss) mit einer hohen Oberflächenqualität hergestellt (die Oberflächenrauigkeit bewegt sich zwischen 0,05 µm und 0,025 µm). Das Verfahrensprinzip ist wie folgt: Aufschmelzung des Eingangsmaterials im Hochvakuum (Induktion), schließen der Form, Füllung der Kavität im Vakuum mit Hilfe des

Kolbens, Abkühlung, Werkzeugöffnen (siehe Abb. 4.35) und Auswerfen des Produktes. Die Zykluszeit ist ca. 3 bis 5 Minuten länger als beim üblichen Spritzgießen, damit jedoch immer noch deutlich kürzer als bei der Metallbearbeitung.



Abb. 4.34 Beispiele für Produkte aus Spritzgossenen Metall-Legierungen



Abb. 4.35 Detail eines Werkzeuges (links) und einer Maschine für das Spritzgießen von Metallen (rechts)

4.13

Niederdruck-Spritzgießen

Beim **Niederdruck-Spritzgießen**, auch als **RIM-Verfahren** (RIM - Reaction Injection Moulding) bekannt, wird im Vergleich zum konventionellen Spritzgießen in das Werkzeug keine Kunststoffschmelze, sondern eine Flüssigkeit (Monomere) eingespritzt. Diese besitzt eine deutlich höhere Fließfähigkeit (siehe Tab. 4.2). Die Steifigkeit des Teils wird durch eine exotherme Reaktion, die Polyreaktion, erreicht. Sie läuft in der Kavität ab.

Vorteile des RIM-Verfahrens sind die hohe Fließfähigkeit der niedermolekularen Komponenten – Monomere (Isokyanat und Polyol), eine nur kleine Moleküldeformationen und somit die Möglichkeit der Herstellung von großen und großflächigen Teilen

(siehe Abb. 4.36), die Herstellung großer Teile mit kleinen Wandstärken bei niedrigen Drücken, niedrige Herstellungskosten (geringer Werkzeugpreis), die Herstellung von Teilen ohne innerer Spannung, ergänzende Deformationen und Einfallstellen auch bei unterschiedlichen Wandstärken, die Möglichkeit die Eigenschaften des Teils durch die Kombination von monomeren Komponenten und durch technologische Parameter zu beeinflussen, der Spritzguss des Polymers in das Werkzeug mit höherer Temperatur als die Temperatur der eingespritzten Schmelze und eine niedrigere Teilschwindung. Die **Nachteile** des RIM-Verfahrens sind relativ lange Zykluszeiten und hohe Ansprüche an die Entlüftung.

Tab. 4.2 Hauptunterschiede zwischen dem RIM-Verfahren und dem konventionellem Spritzguss

Prozessparameter	RIM-Verfahren	Konventioneller Spritzguss
Prozesstemperatur [°C]	30 bis 130	150 bis 380
Werkzeugtemperatur [°C]	75 bis 150	20 bis 230
Spritzdruck [MPa]	1,5 bis 20	20 bis 120
Schließkraft [kN]	400 bis 600	> 30 000
Kunststoffviskosität [Pa·s]	0,1 bis 1	10 ² bis 10 ⁵

Für das RIM-Verfahren werden Einzelkomponenten verwendet, aus denen durch eine chemische Reaktion Polyurethan (PUR), Polyamid (PA) oder Epoxid (EP) entsteht.



Abb. 4.36 Beispiele von Teilen, die mit der RIM-Technik hergestellt werden

Das Prinzip des RIM-Verfahrens (siehe Abb. 4.37) ist wie folgt: Schließen des Werkzeuges, Beförderung der Flüssigkeiten durch die Druckpumpen zu dem Werkzeug, Mischung einzelner Flüssigkeiten kurz vor dem Spritzguss in der Werkzeugkavität (Bestandteil des Werkzeuges ist auch die Mischeinheit), Spritzgießen, chemische Reaktion, Aushärten. Das Polymer (in der Endphase hart oder schaumartig) wird in dem Werkzeug ausgehärtet. Ebenso kann das Kunststoffteil teilweise im Werkzeug ausgehärtet und nachfolgend in einem abgetrennten Werkzeug fertigausgehärtet werden, wobei dazwischen ein weiterer Zyklus verläuft.

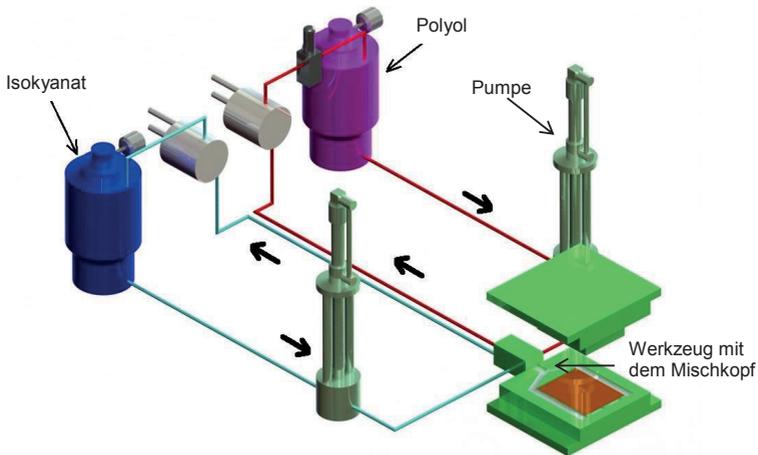


Abb. 4.37 Prinzip des RIM-Verfahrens

Technologische Alternativen des RIM-Verfahrens sind das *Reinforced Reaction Injection Moulding* (RRIM) und das *Structural Reaction Injection Moulding* (SRIM). Bei dem RRIM-Verfahren werden vor dem Spritzguss feste versteifende Elemente (z.B. Glasfaser oder Mineralfüllstoffe) in die Flüssigkeit zugegeben. Beim SRIM-Verfahren wird als versteifendes Element ein Gewebe, Gestrick oder eine Vorform, in das Werkzeug eingelegt.

Die Anlagen für das RIM-Verfahren, Maschinen und Werkzeuge sind günstiger als beim konventionellen Spritzgießen, da mit geringeren Drücken gearbeitet wird (siehe Tab. 4.2 und Abb. 4.38). Die Werkzeuge haben für beide Komponenten eine Misch-

einheit, einen Füllbereich und eine sehr gute Entlüftung dank der niedrigen Fülldrücke.



Abb. 4.38 Maschine für das RIM-Verfahren

4.14

Spritzprägen

Das **Spritzprägen** oder auch Spritzguss mit Nachformen (CIM - Compress Injection Moulding) ist ein Verfahren, bei dem im Vergleich zum konventionellen Spritzguss die Schmelze mit Hilfe der Schließkraft in die Maschine gedrückt wird. Die Schließkraft (Schließeinheit) übernimmt die Nachdrucksfunktion.

Das Spritzprägen hat mehrere Prozessalternativen. Eine davon ist ein Prozess, bei dem vor dem eigentlichen Spritzguss das Werkzeug ein Stück geöffnet und so in das geöffnete Werkzeug die exakte Dosis der Schmelze eingespritzt wird (siehe Abb. 4.39). Es folgt die Erhöhung der Schließkraft und somit auch der Nachdruck der Schmelze. Eine weitere Alternative sind Spritzgießmaschinen mit einer programmgesteuerten Schließkraft. In der Spritzphase der Polymerschmelze wird die Schließkraft durch eine Programmsteuerung vermindert. Als Folge des Druckanstiegs in der Kavität öffnet sich in der Trennebene der Form ein Spalt. Die Schließkraft wird durch die Programmsteuerung erhöht und dadurch der Nachdruck erzeugt. Weitere Prozessphasen sind mit dem üblichen Spritzgießen identisch.

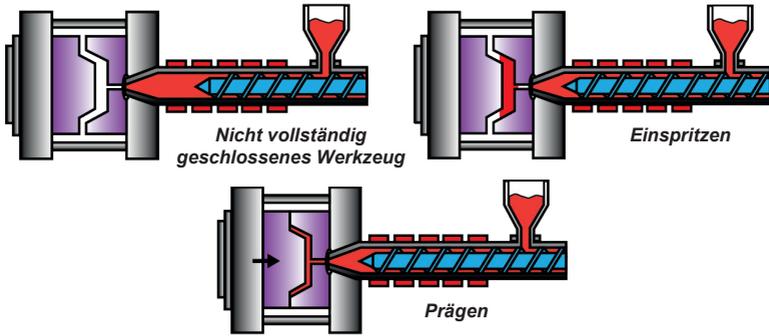


Abb. 4.39 Prinzip des CIM-Verfahrens mit nicht vollständig geschlossenem Werkzeug

Das CIM-Verfahren ermöglicht eine hohe Formgenauigkeit auf der ganzen Produktfläche, niedrige Schwindungswerte, Deformationen und innere Spannung, da der durch die Schließkraft erzeugte Druck gleichzeitig und direkt auf die Schmelze im ganzen Volumen einwirkt. Das Verfahren wird zum Beispiel zur Herstellung von Optikeilen, Kontaktlinsen, Kunststoffgläsern und Gestellen (siehe Abb. 4.40), CDs oder DVDs verwendet.



Abb. 4.40 Beispiel eines mit dem CIM-Verfahren hergestellten Produkts

Der **Tandemspritzguss** (TIM - Tandem Injection Moulding) besteht aus zwei Kavitäten hintereinander in einem Spritzgießwerkzeug (siehe Abb. 4.41). Diese Hohlräume werden in exakt definierten Zeitzyklen mit Schmelze gefüllt, nachgedrückt und abgekühlt (ähnlich wie beim konventionellen Spritzgießen).

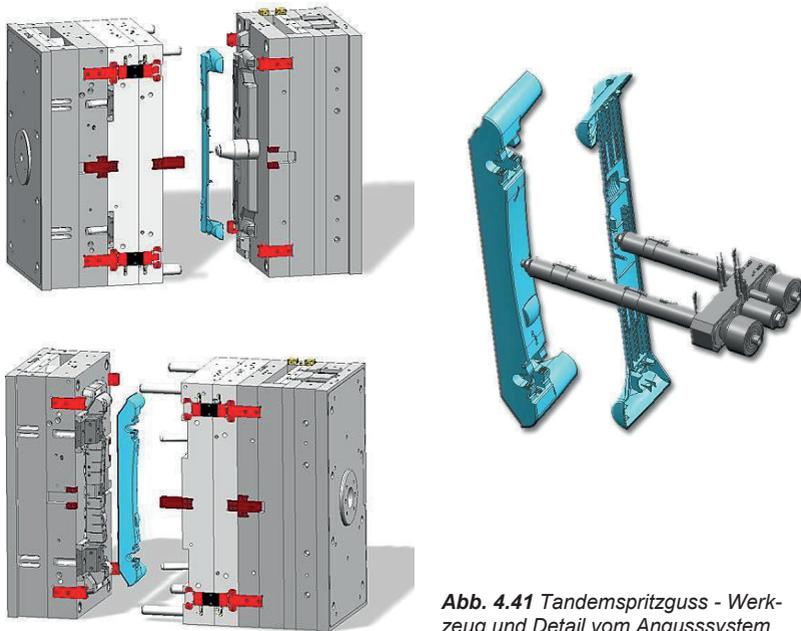


Abb. 4.41 Tandemspritzguss - Werkzeug und Detail vom Angussystem

Beim TIM-Verfahren wird das Werkzeug und somit eine Kavität geöffnet, das Produkt ausgeworfen, das Werkzeug wieder geschlossen und mit Schmelze gefüllt. Während der Nachdrucksphase findet in der zweiten Kavität die Abkühlung statt (siehe Abb. 4.42). Das Spritzgießwerkzeug hat eine Zwischenplatte die verriegelt werden kann. Das Werkzeug kann an den einzelnen Trennebenen geöffnet werden. Es können Produkte mit gleichem aber auch unterschiedlichem Volumen hergestellt werden. Vorteil der Technik ist nicht nur die Erhöhung von Produktivität der Fertigung, sondern auch die Verminderung der Schließkraft der Spritzgießmaschine. Ein Nachteil ist der höhere Preis des Werkzeuges.

Spritzgussverfahren



Tandemspritzgussverfahren

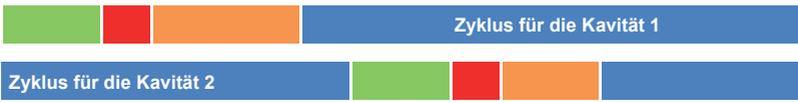


Abb. 4.42 Beispiel für den Zeitzyklus beim Tandemspritzguss

4.16

Hochdruckspritzguss – X-melt

Das **X-melt-Verfahren** (Fa. Engel) ist das Spritzgießen unter Hochdruck. Bei dem Verfahren wird die Schmelzkammer mit einer programmgesteuerten Düse mit pneumatischem Dorn verwendet.

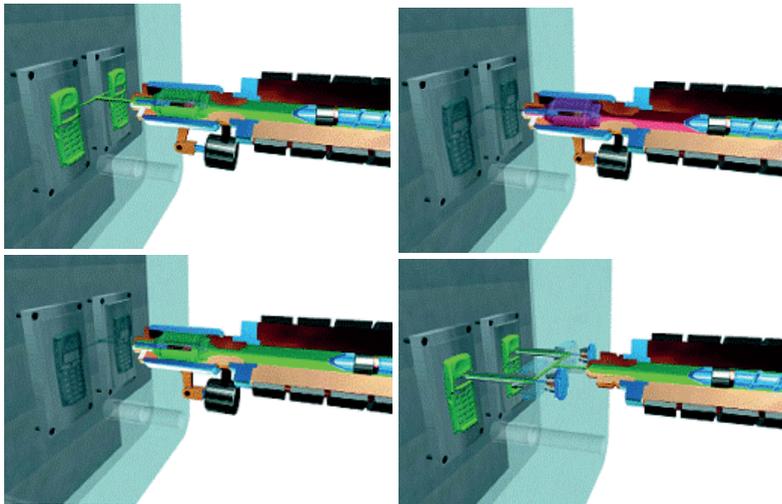


Abb. 4.43 Prinzip des Spritzgießens der Schmelze unter Hochdruck (Plastifizierung, Zusammendrücken, Expansion über den kalten und heißen Angussssystem)

Das technologische Prinzip ist folgendes: Schließen des Werkzeuges, Schließen der Düse mit einem Dorn, Plastifizieren und Zusammendrücken der Schmelze zwischen der geschlossenen Düse und der Schneckenfront durch die Bewegung der

Schnecke nach vorn (der Kompressionsdruck in der Schmelze bewegt sich zwischen 100 MPa und 250 MPa, wodurch eine Volumenverminderung entsteht), Zeitverzögerung (es kommt zur thermischen Homogenität der Schmelze), Öffnen der Düse und Füllen der Kavität (die Schmelze vergrößert ihr Volumen, expandiert und relaxiert), es folgt der Nachdruck, Abkühlung, Öffnen des Werkzeuges und Auswerfen des Werkstücks (siehe Abb. 4.43). Die Technik wird zur Herstellung von formanspruchsvollen und filigranen Teilen bis zu einem Gewicht von ca. 20 g angewendet, siehe Abb. 4.44.



Abb. 4.44 Beispiele von Teilen die mit dem X-melt Verfahren hergestellt werden

4.17

Strukturschaum-Spritzgießen

Das **Strukturschaum-Spritzgießen** wird zur Herstellung von Kunststoffteilen mit einer sehr niedrigen Dichte und Gewicht verwendet. Die am meisten verwendeten Kunststoffe für Strukturschäume sind ABS, PA, PE, PC, PP, PS, PBT, PC/ABS und thermoplastische Elastomere. Produkte aus Strukturschäumen haben eine kompakte Oberflächenschicht und einen geschäumten Kern. Sie finden nicht nur als Isolierwerkstoffe im Bauwesen und in der Verbrauchsgüterindustrie Anwendung, sondern auch in der Automobilindustrie (siehe Abb. 4.45), bei der Herstellung von dickwandigen Teilen (10 mm und mehr) und bei der Spielzeugherstellung. Zurzeit können in einem Produkt beispielsweise Schäume unterschiedlicher Härte eingespritzt werden.

Aus technischer Sicht gibt es mehrere Methoden zur Herstellung einer aufgeschäumten Struktur. Dazu zählen *chemische* und *physikalische Prozesse*. Die erste Möglichkeit der Strukturschaumherstellung ist das Spritzgießen von Kunststoffgranulat mit Zugabe eines **chemischen Treibmittels**. Die Kunststoffe werden durch die Zugabe von 0,5 % bis 3 % des chemischen Treibmittels aufgeschäumt. Infolge der Aufheizung der Schmelze während der Plastifizierung kommt es zur Aktivierung der

Treibmittel (sie zersetzen sich und geben Gase frei). Es folgt die Füllung des Werkzeughohlraums zu 60 % bis 80 % mit Schmelze. Das Füllungsmaß wird je nach der geforderten durchschnittlichen Werkstückdichte gewählt. Infolge der Expansion des Treibmittels in dem Werkstück kommt es zur Herstellung der Schaumstruktur und zur Füllung der gesamten Kavität. Das Treibmittel übernimmt die Nachdrucksfunktion. Der Prozess geht weiter mit der Kunststoffabkühlung, die wegen thermisch-isolierenden Eigenschaften der Strukturschäume deutlich schwieriger ist (Zyklusverlängerung) und letztendlich mit dem Auswerfen vom Werkstück.



Abb. 4.45 Beispiele von Kunststoffteilen mit Strukturschäumen

Die Strukturschäume können an üblichen Spritzgießmaschinen mit genügender Spritzgeschwindigkeit entweder mit der Nieder- oder der Hochdruckmethode verarbeitet werden. Der Gasdruck beim Niederdruckverfahren bewegt sich bei 3 MPa, beim Hochdruckverfahren überschreitet er 3 MPa. Nachteil der Hochdruckmethode sind Oberflächenfehler und eine lange Zeit zur Verflüchtigung der Treibmittelreste, was nachträgliche Verfahrensschritte beeinflusst. Die Schließkraft der Maschine ist infolge der niedrigen Spritzdrücke zwischen 25 % und 50 % der Schließkraft beim konventionellen Spritzgießen.

Ein weiteres Verfahren nutzt physikalische Treibmittel wie Pentan in Polystyrol (PS). Die Dichte des Enderzeugnisses liegt zwischen 10 kg/m^3 und 15 kg/m^3 . Das Prinzip der Technologie ist das folgende: Vorschäumen der PS-Kügelchen bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ mit Heißdampf (siehe Abb. 4.46), Füllung der Kavität vom geschlossenen Werkzeug, Nachschäumen der Kügelchen bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$, Abkühlen, öffnen des Werkzeugs und Auswerfen des Werkstücks. Eine Alternative zu diesem Verfahren ist die Methode des Vollsäumens in der Werkzeugkavität. Bei diesen Beispielen wird von expandiertem Polystyrol (PS-E) gesprochen. Es gibt auch XPS-Werkstoffe, deren

ganzes Volumen aufgeschäumt ist und durch Extrusion hergestellt wird (siehe Abb. 4.47).



Abb. 4.46 PS-Kügelchen (links) und vorgeschäumte PS-Kügelchen (rechts)

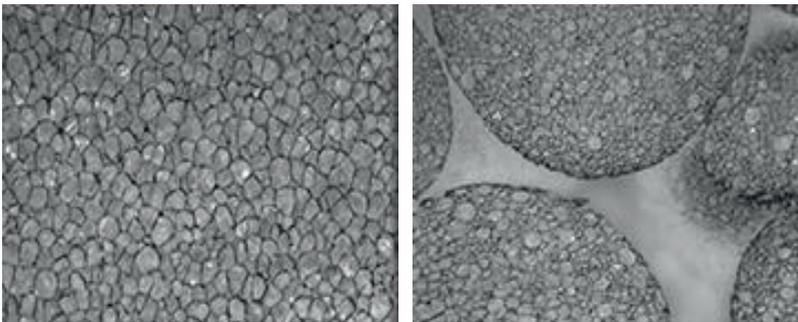


Abb. 4.47 Extrudiertes Polystyrol (links) und expandiertes Polystyrol (rechts)

Eine sehr moderne Methode der Herstellung von Strukturschäumen ist die Verwendung **physikalischer Treibmittel** wie beispielsweise Stickstoff (N_2) oder Kohlendioxid (CO_2). Diese Technologie ist als „*MuCell*“ (Fa. Trexel) bekannt. Bei diesem Verfahren wird das Gas während der Plastifizierung nicht über ein Treibmittel, sondern mit einem speziellen Injektor in die Schmelze dosiert. Dieser ist Bestandteil der Spritzeinheit (siehe Abb. 4.48). Das Gas befindet sich im Zustand eines superkritischen Fluids, das die homogene Herstellung von Mikroblasen mit gleicher Größe im Bereich von $10\ \mu m$ bis $100\ \mu m$ ermöglicht, siehe Abb. 4.49. Die Menge und Größe von Mikroblasen ist von der Viskosität der Schmelze, Abkühlungszeit, Spritzdruck, Gasmenge und Teildicke abhängig. Nach der Füllungs- und Nachdrucksphase

folgt die Abkühlungsphase, die gegenüber dem konventionellen Spritzgießen kürzer ist. Am Ende öffnet sich das Werkzeug und das kompakte Werkstück wird ausgeworfen.



Abb. 4.48 MuCell-Spritzeinheit mit der Injektoren plus Druckregelung

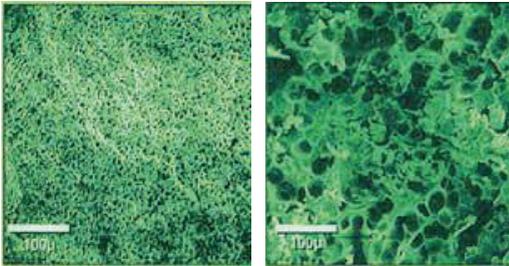


Abb. 4.49 Vergleich der Struktur des Werkstücks bei Verwendung eines physikalischen (links) und chemischen Treibstoffes (rechts)

Vorteile dieser Technologie sind die Reduzierung des Gewichts von Spritzgussteilen um bis zu 30 % bei Bewahrung der mechanischen Eigenschaften, eine gleichmäßige Verteilung von Mikroblasen, die Eliminierung von Deformationen und Einfallstellen, eine Reduzierung der Schwindung, die Kürzung des Zyklus, die Reduzierung der Schließkraft um ca. 30 % bis 60 % gegenüber der konventionellen Spritzgusstechnik. **Nachteile** der Mucell-Technologie sind die mangelhafte Oberflächenqualität (Schlierenbildung / Gaseinschlüsse, siehe Abb. 4.50) und höhere Kosten für die Maschinenausstattung.

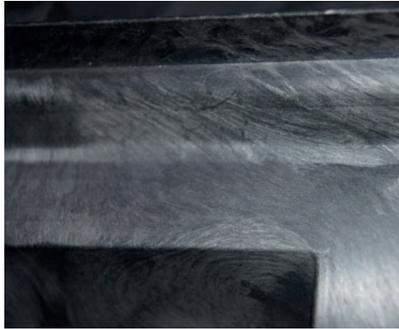


Abb. 4.50 Oberfläche eines mit Mucell hergestellten Kunststoffteils

4.18

Hinterspritz-Verfahren

Bei dem **Hinterspritz-Verfahren** (Hybridtechnologie, InMould, IML - InMould Labelling, IMD - InMould Decoration) wird das eingelegte Material (z.B. Metall, Kunststoff, Textile oder Schaum) mit der Schmelze überspritzt (siehe Abb. 4.51). Dabei kommt es zur Verbindung der zwei Werkstoffe. Ziel ist die Verbesserung der optischen Eigenschaften des Produkts, der Qualität seiner Oberfläche, die Erhöhung seiner mechanischen Eigenschaften und die Reibungs- und UV-Beständigkeit (siehe Abb. 4.52). Der Kunststoff stellt die Abmessungs- und Formstabilität des eingelegten Teils sicher.

Das Prinzip des Hinterspritz-Verfahren ist wie folgendes: Öffnen der Form, Einlegen der Folie, Textile oder andere Materialien in die Trennebene des Werkzeuges, Schließen des Werkzeuges, Füllen des Werkzeughohlraums (Hinterspritzen des eingelegten Materials), Nachdruck, Abkühlen, Öffnen des Werkzeuges und Auswerfen des Werkstücks (siehe Abb. 4.53). Aus der Sicht des Drucks (verringertes Spritzdruck, Kompressionsprozess) oder der Form des eingelegten Materials (Endlosmaterial von der Rolle, zugeschnittenes oder umgeformtes Halbzeug) gibt es viele technologische Alternativen.



Abb. 4.51 Hinterspritzen von Folien



Abb. 4.52 Beispiele von Kunststoffteilen,
die mit dem Hinterspritz-Verfahren hergestellt wurden

Die Herstellungsmethode der eingelegten Werkstoffe und ihre Orientierung beim Einlegen in das Werkzeug beeinflussen die Deformation beim Hinterspritzen. So kann beispielsweise ihr Durchreißen vermieden werden. Beim Spritzgießen werden niedrige Spritzdrücke verwendet. Der Abkühlprozess wird durch die thermischen Eigenschaften des eingelegten Materials (Metall, Polymer, Naturwerkstoff usw.) beeinflusst. Vor dem Öffnen des Spritzgießwerkzeuges wird die überflüssige Folie (Textile) meistens im Werkzeug abgeschnitten. Sie kann jedoch auch erst nach dem Ausnehmen aus dem Werkzeug abgetrennt werden.

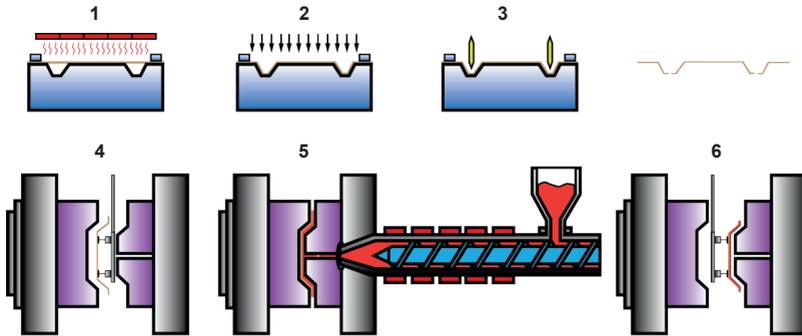


Abb. 4.53 Hinterspritzen eines vorgeformten Halberzeugnisses

1 – Aufheizung des Halberzeugnisses; 2 – Vorformen; 3 – Abschneiden; 4 – Einlegen des Halberzeugnisses in das Werkzeug; 5 – Hinterspritzen mit Schmelze; 6 – Ausnehmen des Spritzgussteils aus dem Werkzeug

4.19

Hinterspritzen von Organoblechen

Beim **Hinterspritzen von Textilien** (Organomelt) wird ein vorgeformtes Textilprodukt aus verschiedenen Faserarten (beispielsweise Glas- oder Kohlenstofffaser) in die Spritzgießform eingelegt und nachfolgend mit Schmelze hinterspritzt. Im Vergleich zum Hinterspritzverfahren kommt es hier zum Durchtränken des Textils mit Kunststoff. Es werden somit hoch feste, gleichzeitig jedoch auch leichte Kunststoffteile, die Stahl- und Aluminiumbleche ersetzen können, hergestellt (siehe Abb. 4.54).



Abb. 4.54 Beispiele von Teilen die mit Organomelt hergestellt wurden

Das Prinzip dieser Technologie ist wie folgt: Aufheizung des Textils mit Infrarotstrahlung (siehe Abb. 4.55), vorformen des Textils, Einlegen des vorgeformten Halbprodukts in das Werkzeug, Schließen des Werkzeuges, Füllen der Kavität mit Schmelze, Nachdruck, Abkühlen, Öffnen der Form, Auswerfen des Werkstücks und Abschneiden des übermäßigen Textilmaterials. Zur Herstellung in Produktionslinien werden Anlagen verwendet, bei der die Heizung und die Verformungsmaschine mit der Spritzgießmaschine kombiniert sind (siehe Abb. 4.56).



Abb. 4.55 Aufheizen mit Infrarotstrahlung

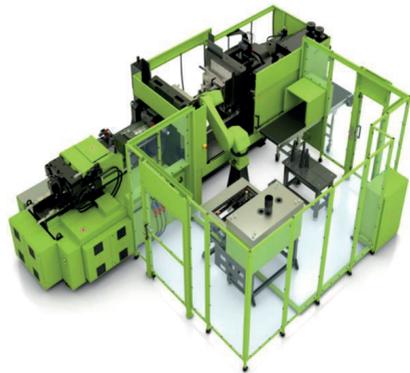


Abb. 4.56 Herstellungslinie von Organoblechen

4.20

Mikrospritzgießen

Mit dem **Mikrospritzgießverfahren** werden Kunststoffteile von sehr kleinen Abmessungen oder Gewichten (von 0,004 g bis 15 g) hergestellt, (siehe Abb. 4.57). Das Verfahren ist dem konventionellen Spritzgießen sehr ähnlich. Zum Mikrospritzgießen werden spezielle Spritzgießmaschinen mit kombinierter Spritzeinheit (z.B. Plastifizierung der Schnecke, Spritzgießen mit Kolben) verwendet. Die Herstellung von Werkzeugen ist hinsichtlich der Größe der Teile sehr spezifisch. Die Abmessungen der hergestellten Teile werden meistens unter dem Mikroskop kontrolliert.



Abb. 4.57 Beispiele von Kunststoffteilen die mit dem Mikrospritzgieß-Verfahren hergestellt wurden

Das **Spritzgießen und Schweißen im Werkzeug** (Joinmelt-Verfahren) ist ein Verfahren, welches das Spritzgießen und Fügen in einem Werkzeug kombiniert. Das Verfahren ist folgendes: Schließen des Werkzeuges, Füllen der Kavität mit Schmelze, Nachdruck, Abkühlen, Öffnen des Werkzeuges, Bewegen einer Werkzeughälfte sodass die zu fügenden Spritzlinghälften sich gegenüber liegen, Zuschieben des Heizkörpers, Einschmelzen von Verbindungsflächen, entfernen des Heizelements, Schließen des Spritzgießwerkzeuges (es kommt zur Verbindung der Teile), Öffnen des Werkzeuges und Auswerfen des Werkstücks (siehe Abb. 4.58). Vorteil dieses Verfahren ist die exakte Position der Werkstückteile zueinander. Nachteilig sind jedoch die längeren Zykluszeiten. Diese ergeben sich dadurch dass zwei Arbeitsgänge erforderlich sind.

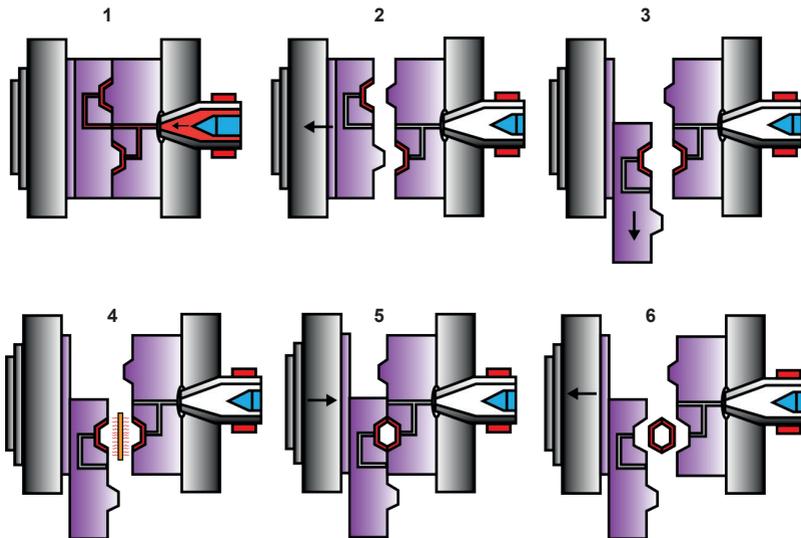


Abb. 4.58 Prinzip des Schweißen im Spritzgießwerkzeug,

1 – Spritzgießen der Teile; 2 – Werkzeug öffnen; 3 – Bewegen des Werkzeuges in die Schweißposition; 4 – Heizen; 5 – Schweißen; 6 – Entformen der Kunststoffbauteile

Neben den beschriebenen speziellen Spritzgießtechniken von Kunststoffen und Compositen gibt es noch weitere Verfahren. Dabei sind das *Sequenzspritzgießen*, die *Vakuumtechnik*, das *Extrusion-Spritzgießen*, *Intellimould* und die *Kombination von Spritzguss und Compoundierung* zu nennen.

Sequenzspritzgießen (MLFM - Multi Live Feed Injection Moulding) ist ein Verfahren, bei dem die Schmelze während der Füllungs- und Nachdrucksphase über mehrere Angusskanäle kontrolliert in die Kavität fließt. Dabei kommt es während eines Zyklus zum Mischen der Schmelze im Werkzeughohlraum. Die Kunststoffe werden zum Vermischen Nacheinander im Werkzeughohlraum zyklisch zusammengepresst. In der Nachdrucksphase werden beide Ströme gleichzeitig zusammengedrückt. So wird die Anzahl der Produktfehler vermindert, die Festigkeit von versteiften Kunststoffen erhöht, die innere Spannung vom Werkstück vermindert und die Entstehung von Bindenähten (Oberflächenfehler bei Kunststoffteilen) eliminiert. Dieses Verfahren wird insbesondere bei Kunststoffen angewendet, die mit versteifenden (aber auch nicht versteifenden) Füllstoffen gefüllt werden.

Die **Vakuumtechnik** ist ein Verfahren, bei dem die Luft abgesaugt, bevor die Schmelze in die Kavität eingespritzt wird.

Intelligentes Spritzgießen (Intellimould) ist ein Prozess, bei dem ein Luftgegen- druck erzeugt, während der Kunststoff in die Kavität eingespritzt wird.

Extrusion-Spritzgießen ist ein Prozess, bei dem die Schnecke keine axiale Bewegung in Werkzeugrichtung ausübt, sondern durch Rotation (wie bei der Extrusion) die Schmelze in die Kavität eingespritzt. Die Spritzdrücke sind dabei deutlich niedriger als beim klassischen Spritzgießen. Der Nachdruck wird durch die Schnecke erzeugt, indem sie Schmelze in die Kavität drückt. Diese Technologie wird verwendet, wenn die Spritzgießkapazität der Maschine nicht ausreichend ist.

Kombination des Spritzgießen mit der Compoundierung (IMC – Injection Molding Compounder, Firma Kraus Maffei) ist ein Verfahren, was die Vorteile der Extrusions - Compoundierung und die des Spritzgießverfahrens kombiniert (siehe Abb. 4.59). Der Prozess der Granulierung und Wiederaufschmelzung von Kunststoffgranulat wird dabei eliminiert. Das Verfahren verläuft in einer Maschine, die neben der Spritzeinheit für die Füllung der Kavität und der Erzeugung des Nachdrucks auch

eine Extrusionseinheit für das Vermengen des Polymers mit Füllstoffen (nicht nur auf Faserbasis) enthält (siehe Abb. 4.60).

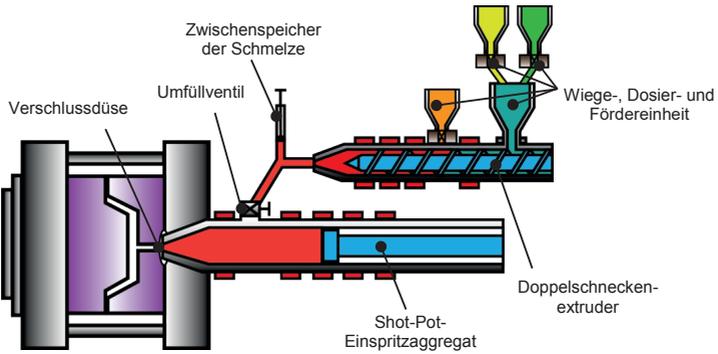


Abb. 4.59 Spritzgießen mit Compoundierung



Abb. 4.60 Beispiel einer Maschine für das Spritzgießen mit Compoundierung

Das **Extrusionsverfahren** ist nach dem Spritzgießen die zweit meist verbreitete Technik der Verarbeitung von Polymeren. Jedes Jahr werden mehr als 90 Millionen Tonnen Thermoplaste mit dieser Verfahrenstechnik verarbeitet. Das Prinzip des Verfahrens ist die Polymerumwandlung in einen plastischen Zustand, seine Homogenisierung und das Herauspressen über einen Presskopf in den freien Raum. Typische Produkte sind Halbprodukte in Form von Platten, Folien, Rohren und Profilen, die zur weiteren Verarbeitung mit der Formungs-, Ausblas-, Schweiß- oder Klebetechnik benötigt werden (siehe Abb. 5.1).



Abb. 5.1 Beispiele von Produkten die mit der Extrusionstechnik hergestellt wurden

Zu den **größten Vorteilen**, aus welchem Grund die Extrusionstechnik eine breite Anwendung findet, gehören insbesondere:

- Eine kontinuierliche Produktion von Teilen,
- Eine große technologische Variabilität (Platten, Profile, Ummantelung),
- Die Fertigung von dünn- und dickwandigen Produkten großer und kleiner Abmessungen,
- Eine relativ einfache Fertigungsanlage,
- Die Verarbeitung von den Mehrschichtwerkstoffen.

Dagegen gehören zu den **größten Nachteilen** der Extrusionstechnik:

- Eine deutliche verfahrenstechnische Beschränkung der Produktion durch eine kontinuierliche Fertigung,
- Die Volumensteigerung beim extrudierten Polymer,
- Eine geringere Fertigungsexaktheit im Vergleich zur Spritzgießtechnik.

Zurzeit gibt es eine breite Skala von verschiedenen Extrudertypen. Sie unterscheiden sich vor allem im kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Fertigungsprozess. Die kontinuierliche Produktion wird mit rotierenden Elementen (Scheiben, Schnecken) und die diskontinuierliche mit Hebeelementen (Kolben) sichergestellt.

Kolbenextruder

Zu den Vertretern des diskontinuierlichen oder zyklischen Verfahrens gehört der einfache oder mehrfache Kolbenextruder. Vorteile dieser Maschinen sind große Drücke (bis 300 MPa) und die Einfachheit der Anlage. Nachteile sind dagegen die geringe Plastifizierungskapazität und eine schlechte Temperaturhomogenität der Schmelze. Ein Anwendungsbeispiel von einfachen Kolbenextrudern ist die Extrusion von Halbzeugen aus schwer verarbeitbaren Materialien, wie z.B. hochmolekulares Polyethylen (PE-UHMW) und Polytetrafluorethylen (PTFE). Die mehrfachen Kolbenextruder werden eingesetzt um den diskontinuierlichen Prozess zu eliminieren.

Plattenextruder

Die Plattenextruder gehören zu den kontinuierlichen Fertigungsanlagen und nutzen den sog. Weissenberg-Effekt. Dabei entsteht durch die Elastizität der Schmelze eine Spannung senkrecht zur Oberfläche des Rotationskörpers, wodurch es zur Extrusion der Schmelze kommt. Das Material wird zwischen einer statischen und einer beweglichen Platte erwärmt (durch Wärme und Reibung), mit Scherkräften belastet, wodurch in der Schmelze Normalkräfte entstehen und durch eine mittlere Öffnung in der festen Platte ausgepresst wird. Vorteile der Plattenextruder sind die schnelle Plastifizierung des Polymers, eine hohe Homogenität der Schmelze und die Möglichkeit Pulverwerkstoffe zu verarbeiten. Ein Nachteil ist dagegen der niedrige Auspressdruck.

Schneckenextruder

Die Schneckenextruder sind dank ihrer Universalität, gutem Verhältnis zwischen Preis-Leistung und Zuverlässigkeit die meist verwendeten Maschinen. Sie setzen sich aus vielen Funktionselementen zusammen (siehe Abb. 5.2 und Abb. 5.3). Zu den Grundeinheiten gehören: Trichter, Rahmen, Heiz-, Regulier- und Steuerkomponenten, Steuereinheit, Elektromotor, äußere und innere Ummantelung der Plastifizierungseinheit und eine Schnecke. Die Schnecke ist die wichtigste Komponente. Sie stellt die Plastifizierung, Homogenisierung und nachfolgend auch das Auspressen vom Material sicher. Für diesen Zweck kann die Geometrie der Schnecke in drei Grundbereiche unterschieden werden. Der erste Bereich ist die *Beförderungszone* (Bereich unter dem Trichter). Aufgabe dieses Schneckenbereichs ist das Material in weitere Zonen zu befördern, Luft zwischen den Granulatstücken zu verdrängen, sie am Ende dieser Zone zu erwärmen und zu schmelzen (gegenseitige Materialfraktion und Wärmeübergabe in die Heizelemente). An die Beförderungszone schließt sich die *Kompressionszone* an, in der es zu einer deutlichen Materialkompression und meist zu einer intensiven Schmelzung kommt. Der letzte Teil ist die *Homogenisierungszone*, bei der das Polymer komplett plastifiziert und seine Homogenisierung beendet wird. Da jedes Polymer spezifische Eigenschaften besitzt (z.B. Viskosität und Verarbeitungstemperatur), kann keine universelle Schnecke entworfen werden, die alle Polymertypen extrudieren könnte. Deswegen sind viele verschiedene Schneckentypen entwickelt worden. Sie unterscheiden sich in der Länge, den einzelnen Zonen, im Durchmesser, in der Steigung, im Gewindeabstand usw. Allgemein können für die unterschiedlichen Schnecken beispielsweise folgende Typen genannt werden: Schnecken mit einer reduzierten Gewindesteigung (für PVC geeignet), Schnecken mit einer langen Kompressionszone (für ABS, PA geeignet), Schnecken mit einer kurzen Kompressionszone (für PP, PA



Abb. 5.2 Schneckenextruder

geeignet), Schnecken mit einem glatten Zylinderende (für PS geeignet), Schnecken mit einer Entgasungszone (für PC, ABS geeignet), Schnecken für Kautschuke, Mehrgang- und Barrierschnecken, die eine große Plastifizierungs- und Mischleistung bei niedrigen Drehzahlen erreichen können und somit eine kürzere Plastifizierungszeit erzielen.

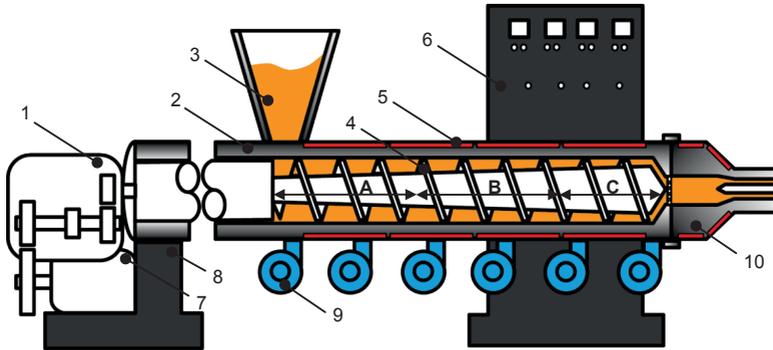


Abb. 5.3 Funktionszonen des Extruders

- 1 – Getriebeeinheit; 2 – Zylinder, Extruderkörper; 3 – Trichter; 4 – Schnecke;
 5 – elektrische Widerstandsheizung; 6 – Steuereinheit, Maschinensteuerung;
 7 – Elektromotor; 8 – Rahmen; 9 – Ventilator; 10 – Extruderkopf;
 A – Beförderungzone der Schnecke; B – Kompressionszone der Schnecke;
 C – Homogenisierungszone der Schnecke

Die Schneckenextruder teilen sich je nach Anzahl der Schnecken in Ein-, Doppel- und Meherschneckenextruder auf. *Einschneckenextruder* (siehe Abb. 5.4) werden vor allem für die Extrusion von Platten, Folien, Rohren und Profilen eingesetzt. Sie können auch zur einfachen Compoundierung, Mischung von Polymeren mit Farbstoffen und weiteren Additiven genutzt werden. Für die Erhöhung der Materialhomogenität sind die Schnecken meistens mit Mischelementen, wie z.B. Dornen, Barrieren und Torpedos, ausgestattet (siehe Abb. 5.5). Deren Aufgabe es ist, die Schmelze in mehrere Ströme aufzuteilen, die vor der Extruderkopfmündung wieder zusammenfallen.



Abb. 5.4 Einschneckenextruder

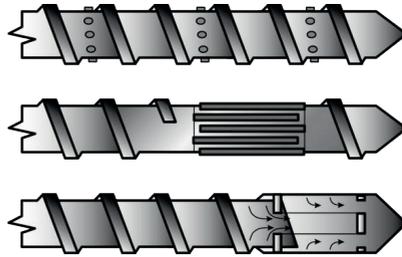


Abb. 5.5 Schnecken mit Mischelementen

Doppelschneckenextruder werden insbesondere zur Compoundierung und Verarbeitung von Werkstoffen mit Fasern oder prozess-empfindlichen Werkstoffen verwendet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Maschinenarten sind deutlich größer als bei Einschneckenmaschinen. Die Schnecken sind oft modular, je nach verarbeiteten Material und technologischen Anforderungen der Produktion, zusammengesetzt. Sie bestehen häufig aus mehr als acht wechselbaren Teilen. Beispiele zur Grundaufteilung von Doppelschneckenextrudern und ihrer möglichen Anwendung sind in Tabelle 5.1 und in Abb. 5.6 bis Abb. 5.8 angeführt.

Tab. 5.1 Aufteilung der Doppelschneckenextruder

Mischextruder	Gleichläufige Drehrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Langsamgang Extruder für Profile • Hochdrehende Extruder für Compoundierung
	Gegenläufige Drehrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Konische Extruder für Profile • Parallelextruder für Profile • Hochdrehende Extruder für Compoundierung
Extruder ohne Mischung	Gleichläufige Drehrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht in der Praxis eingesetzt
	Gegenläufige Drehrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit gleicher Schneckenlänge • Mit unterschiedlicher Schneckenlänge
	Koaxiale Extruder	

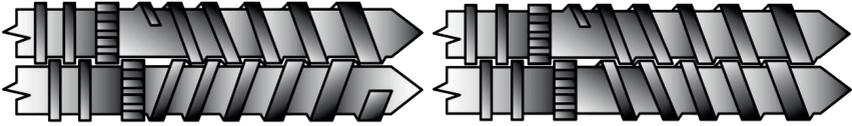


Abb. 5.6 Schnecken paralleler Doppelschneckenextruder - Rotation in gegenläufiger Drehrichtung

Abb. 5.7 Schnecken paralleler Doppelschneckenextruder - Rotation in gleichläufiger Drehrichtung



Abb. 5.8 Konische Schnecken eines Doppelschneckenextruder mit gegenläufiger Drehrichtung

Mehrschneckenextruder sind Maschinen, die mehr als zwei rotierende Schnecken enthalten. Zu den bekannten und verbreiteten Extrusionsmaschinen gehören die Planetenextruder, siehe Abb. 5.9. Die Eingangszone dieser Extruder (Beförderungszone) sieht ähnlich aus wie die der Einschneckenextruder. Der Hauptunterschied ist die Konstruktion der Kompressions- und Homogenisierungszone. Diese Zonen sind von mehreren (standardweise sechs und mehr) kleineren planetenförmig rotierenden Schnecken umgeben, die die große Zentralschnecke rumlaufen. Das Ergebnis ist ein intensives Schmelzen und Vermischen von Material, mit einer sehr niedrigen Temperaturscherbelastung. Die Planetenextruder sind, ähnlich wie die Doppelschneckenextruder, konische Maschinen. Sie sind für die Verarbeitung von sehr empfindlichen Werkstoffen geeignet, bei denen die Degradation des Materials droht (z.B. PVC).



Abb. 5.9 Planetenanordnung der Schnecken



Die ersten Extruder waren Kolbenmaschinen. Sie waren zur Herstellung von Profilen aus Elastomeren bestimmt. Mit dem Jahr 1935 ist der Beginn der Verarbeitung von Thermoplasten mit elektrisch aufgeheizten Einschneckenextrudern in Deutschland datiert. Nachfolgend wurde innerhalb kurzer Zeit die Doppelschneckenmethode für die Extrusion in Italien patentiert.

5.1

Herstellung von Rohrleitungen und Profilen

Zu den typischen Produkten der Extrusionstechnik gehören Rohrleitungen aus PVC, PE-HD, PE-LD, PP, PA, POM und PBT, die einen Durchmesser von bis zu 1 600 mm und eine Dicke von 60 mm besitzen können. Es können einfache und Mehrkammerprofile aus PVC, PS, PMMA, PC und POM hergestellt werden. Ein Beispiel für eine übliche Maschinenanordnung zur Fertigung von Rohrleitungen und Profilen ist in Abb. 5.10 gezeigt. Die Hauptbestandteile sind die Schneckenextruder, der Extruderkopf (bei Rohren ein Extruderkopf mit einem Dorn), die Kalibrier- und Kühleinheit sowie eine Abzugs- und Schneideanlage.

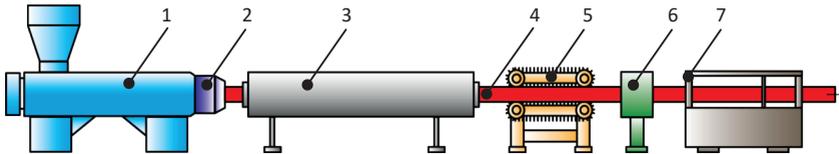


Abb. 5.10 Grundaufstellung einer Extrusionslinie für Rohr- und Profilverfertigung

1 – Extruder; 2 – Extruderkopf; 3 – Kalibrier- und Kühleinheit; 4 – ausgepresstes Rohr oder Profil; 5 – Abzugsanlage; 6 – Bedruck-, Mess- oder Ergänzungsstellen; 7 – Schneideanlage

Extruderkopf

Aus Sicht der Gesamtproduktqualität ist neben der Homogenität der Schmelze auch ihre Formung durch den Extruderkopf wichtig, wo das Material deutlich thermisch und auf Druck belastet wird. Zur richtigen Anwendung des Extruderkopfes müssen viele Grundsätze eingehalten werden. Der wahrscheinlich wichtigste ist der fließende Durchgang der Schmelze. Eine schlechte Konstruktion des Extruderkopfes kann die Erzeugung einer Struktur und unregelmäßige Umfangsgeschwindigkeiten

der Extrusion verursachen. Sie beeinflussen die finalen Eigenschaften des Halbzeugs. Für die Rohr- und Profilherstellung werden insbesondere *Längs-*, aber auch *Querextruderköpfe* verwendet, die für die Extrusion von Rohren und Profilen kleiner Abmessungen geeignet sind. Ein typisches Beispiel der Konstruktionslösung einer Längsrichtung des Extruderkopfs ist in der Abb. 5.11 gezeigt.

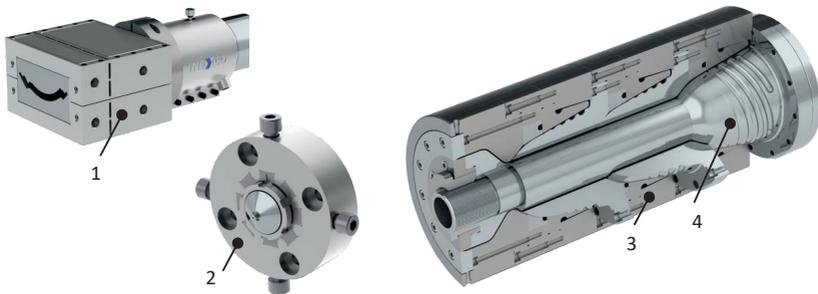


Abb. 5.11 Längsextruderkopf für Rohr- und Profilextrusion

1 – Endteil des Extruderkopfs für Profile; 2 – Endteil des Extruderkopfs für Rohre;
3 – Ummantlung des Grundteils des Extruderkopfs; 4 – Dorn mit Leitungsverteiler

Rohr- und Profilkalibrierung

Beim Durchgang der Schmelze durch den Extruderkopf kommt es zur Kompression, die beim Übergang in den freien Raum das Wachsen der Abmessungen des Profils zu Folge hat, siehe Tab. 5.2. Ursache dieses ungewollten Effekts (der sog. Barus-Effekt) ist das viskoelastische Verhalten der Polymerwerkstoffe. Neben dem Material wird das Wachsen des Profils auch von der Geschwindigkeit der Extrusion und der Geometrie des Extruderkopfes beeinflusst. Zum Erzielen der exakten Teilabmessungen (Eliminierung der Materialpulsierung und Unterschiede in der Eingangsqualität der Werkstoffe) werden deshalb direkt hinter die Extruderköpfe Kalibriertische angebracht. Deren Hauptaufgabe es ist, die Profilabmessungen zu regulieren und sie durch Abkühlung zu fixieren. Je nach Abmessungen können die Kalibriereinheiten für Kalibrierungen der äußeren und inneren Kontur je nach Kraft auf Friktions-, Überdruck- und Unterdruckkalibrierungen aufgeteilt werden.

Tab. 5.2 Anwachsen des Profils im Bereich der Extruderkopfdüse

Material	PE – HD	PE – LD	PVC	PS	PA 6.6	PC
Vergrößerung des Profils	15-60 %	30-60 %	30-35 %	10-20 %	5-15 %	5-10 %

Die *Äußere Friktionskalibrierung (Reibungskalibrierung)* wird für einfache, offene Profile verwendet, siehe Abb. 5.12. Das extrudierte Profil wird mit einer Geschwindigkeit von 1 m/min bis 4,5 m/min über abgekühlte Elemente (Platten, Hülsen) gezogen, wo es schrittweise zur Reduktion seiner Abmessungen (Kalibrierung) kommt. Die Kalibrierelemente sind oft für die Erhöhung ihrer Lebensdauer mit Werkstoffen ummantelt, die einen niedrigen Reibungskoeffizient haben (PTFE).

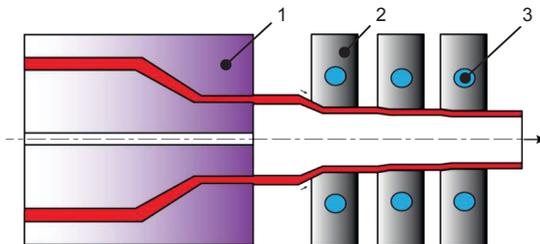


Abb. 5.12 Beispiel einer äußeren Friktionskalibrierung
1 – Extruderkopf; 2 – Kalibrierelemente; 3 – Kühlkanäle

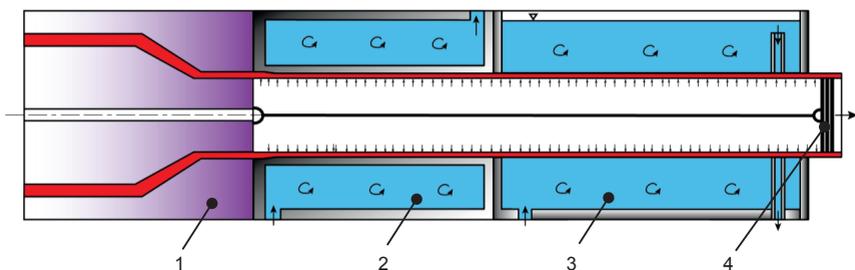


Abb. 5.13 Überdruckkalibrierung des Rohrs
1 – Extruderkopf; 2, 3 – mit Wasser gekühlte Kalibriehülse;
4 – Stöpsel zur Erzeugung von Überdruck

Die *Kalibrierung der äußeren Abmessungen* mit Hilfe von *Druckluft* wird für die Kalibrierung von Profilen (Rohren) mit größeren Abmessungen (Rohre aus PVC mit

einem Durchmesser von mehr als 350 mm, Rohre aus PP mit dem Durchmesser von mehr als 100 mm) verwendet. Das extrudierte Profil wird von außen kalibriert, indem es durch die Wassergekühlte Kalibrierhülse läuft und gleichzeitig mit Luftüberdruck an die Kalibrierhülse gedrückt wird. Zur Erzeugung des notwendigen Luftdrucks, das durch den Extruderkopf mit einem hohlen Dorn zugeleitet wird, ist eine innere Abdichtung des Profils sicherzustellen, siehe Abb. 5.13.

Die *Kalibrierung der äußeren Abmessungen mit Unterdruck (Vakuum)* ist die am meisten angewendete Methode der Kalibrierung. Sie ist für einfache aber auch komplexe Profile (Mehrstufenkalibrierung notwendig) geeignet ist. Der Grund ist die hohe Kalibriergeschwindigkeit und die niedrigen Betriebskosten. Ein Beispiel für die Unterdruck-Kalibrierung ist in Abb. 5.14 abgebildet. Hauptunterschied zu der Überdruck-Kalibrierung ist die Art und Weise der Presskrafterzeugung, die in diesem Fall von der äußeren Seite des Profils einwirkt. Das Profil wird durch den erzeugten Unterdruck zur Kalibrierhülse gezogen.

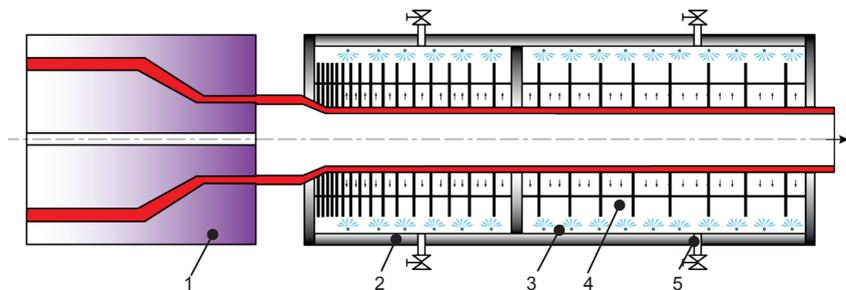


Abb. 5.14 Vakuumkanal-Kalibrierung des Rohrs

1 – Extruderkopf; 2,4 – Kalibrierhülse; 3 – Kühlung durch Sprühnebelinjektion;
5 – Vakuumentil

Die *innere Kalibrierung* wird meistens für die Kalibrierung von Rohren verwendet. Gegenüber der äußeren Kalibrierung handelt es sich um eine nicht so oft verwendete Methode. Das Prinzip dieser Kalibrierung ist das Überziehen des extrudierten Profils über Wassergekühlte Dorne. Die notwendige Kalibrierkraft wird durch das Erstarren des Werkstoffes erzeugt, bei dem es zum Schrumpfen des Profils auf den Dorn kommt.

Produktabkühlung

Während der Kalibrierung kommt es zur Fixierung und Abkühlung des extrudierten Profils. Zu diesem Zweck kann eine Abkühlung in Abhängigkeit von der angewendeten Kalibrier-Technologie und dem extrudierten Material durch direkten Kontakt (Wasserbad, Wassersprühnebelinjektion, siehe Abb. 5.15, Wassersprühnebel) oder indirekten Kontakt (Übergang der Wärme über Kalibrierhülsen) erzielt werden. Die notwendige Zeit zur Kühlung und die Länge der Fertigungslinie unterscheiden sich in Abhängigkeit von den Abmessungen der extrudierten Profile, jedoch auch in Abhängigkeit vom verwendeten Material (Fertigungslinie für Rohrleitungen und Profile aus PE ist länger als für Halbzeuge aus PVC).



Abb. 5.15 Beispiel für die Kühlung mit Wassersprühnebel



Abb. 5.16 „Caterpillar“ Abzug



Abb. 5.17 Automatische Profilschneidung

Produktabzug und -abschneidung

Nach der Kalibrierung und Kühlung des Halbzeugs folgt der Abzug. Er sorgt für einen gleichmäßigen und kontinuierlichen Transport des extrudierten Profils, wodurch seine Maßexaktheit direkt beeinflusst wird. Daher wird die Geschwindigkeit des Abzugs sorgfältig kontrolliert und gesteuert. Zu den meist verwendeten Abzugstypen gehören „Caterpillar“ (siehe Abb. 5.16) und „Gripping wheel“. Ein finaler Arbeitsschritt der Fertigungslinie für Rohre und Profile ist die automatische Kontrolle, das Bedrucken und das Abschneiden. Zum Schneiden werden Kreis- oder Messersägen ver-

wendet, die speziell für die Zertrennung von Polymermaterialien entworfen wurden. Sehr oft wird auch eine automatische Schneideanlage verwendet, siehe Abb. 5.17. Die Schneideeinheit bewegt sich entlang des extrudierten Profils, schneidet das Profil in definiertem Abstand ab und fährt zurück in die Ausgangsposition.

5.2

Herstellung von Platten und Folien

Weitere Produkte die mit der Extrusion hergestellt werden sind Platten und Folien. Der Grundunterschied zwischen einer Platte und einer Folie besteht in der Wandstärke. Charakteristisch ist bei Folien die sehr kleine Wandstärke, die sich für gewöhnlich zwischen 0,2 mm und 0,5 mm bewegt. Für die extrudierten Platten sind Stärken von 0,5 mm bis 25 mm typisch. Der Fertigungsprozess beider Halbzeugtypen ist sehr ähnlich, siehe Abb. 5.18. Das Material wird über einen Extruderkopf in den freien Raum extrudiert, danach folgt die Kalibrierung (das Werkstück wird über einen Zylinder mit Übermaß gezogen); die Zylinderanzahl unterscheidet sich bei Platten und Folien), das Kühlen und Abschneiden (Teilen).

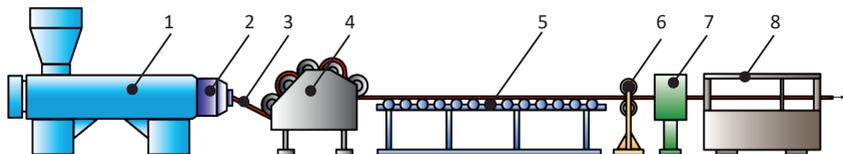


Abb. 5.18 Herstellungslinie für die Plattenherstellung

1 – Extruder; 2 – Extruderkopf; 3 – extrudierte Platte, Folie; 4 – Kalibrierzylinder;
5 – Walzenstrecke (Kühlung); 6 – Abzugsanlage; 7 – Bedruck-, Mess- und weitere ergänzende Anlagen; 8 – Schneideanlage

Extruderkopf

Für die Herstellung von Platten und Folien werden spezielle Querextruderköpfe (Breitschlitzdüsen) verwendet, siehe Abb. 5.19. Durch den Charakter des Produktes (ebene Teile) und den Prozess ist das gleichmäßige Fließen der Schmelze und das Anwachsen des Materials entlang der Profilabmessungen im Bereich der Düse besonders wichtig. In den Extruderköpfen werden deswegen Distributions- und Relaxierkanäle entworfen. Moderne Fertigungsanlagen enthalten deswegen zusätzlich

mit Servoantrieb gesteuerte Schubelemente (Stellschrauben), die in der Kopfbreite eine Änderung der Dicke des extrudierten Profils ermöglicht.

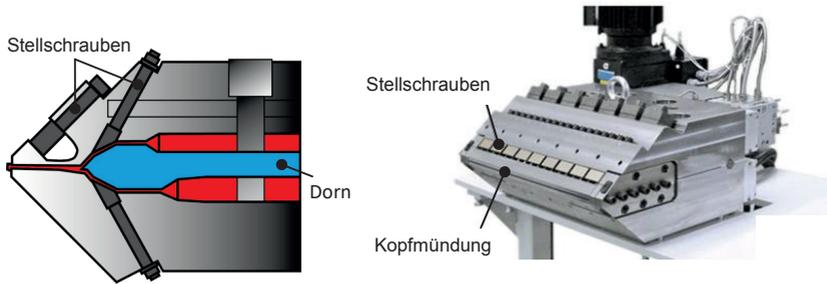


Abb. 5.19 Längsschnitt durch die Breitschlitzdüse

Kalibrierung von Platten und Folien

Eine Kalibrieranlage für die Herstellung von Folien und Platten besteht aus temperierten (abgekühlten) und polierten (bzw. verchromten) Kalandrierwalzen. Zur Herstellung von Platten werden drei (siehe Abb. 5.20), für die Folienherstellung zwei, Kalandrierwalzen zueinander vorgesetzt. Hauptproblematiken von diesem Prozess sind die Steifigkeit der Walzen (Durchbiegung) und eine ungleichmäßige Geschwindigkeit der Extrusion (Schneckenpulsierung). Diese Aspekte beeinflussen direkt die Gleichmäßigkeit der Plattendicke, wodurch sich die Randdicke verringert (durchschnittliche Differenz beträgt 3%). Die Unterschiede der Wandstärken werden mit der Dicke und den Abmessungen der extrudierten Halbzeuge größer. Eine Möglichkeit, diesen ungewollten Effekt zu eliminieren, ist die Nutzung einer Detektionsanlage. Sie ist hinter den Kalibrierwalzen angebracht und ermöglicht, zusammen mit den Stellschrauben des Extruderkopfes, eine Korrektur der extrudierten Profilwandstärke an den notwendigen Stellen. Die Pulsierung der Schnecke kann durch eine Zahnpumpe, die vor den Extruderkopf angebracht ist, eliminiert werden.



Obr. 5.20 Kalibrierung der Wandstärke

Abschneiden des Halbzeugs

Die Ungleichmäßigkeit der Extrusion, das Anwachsen der Profilabmessungen an der Mündung des Extruderkopfes und die Durchbiegung der Kalibrierwalzen sind die Ursachen der unterschiedlichen Breiten der extrudierten Flächenhalbzeuge. Um eine einheitliche Breite zu erzielen ist als weiterer Arbeitsschritt das kontinuierliche Abschneiden in die Herstellungslinie einzugliedern. Das Abschneiden wird meistens mit Scheibensägen umgesetzt.

Recken (Orientieren) des Halbzeugs

Bei der Fertigung von Folien wird oft das Recken als Arbeitsschritt eingegliedert. Mit diesen Arbeitsschritt soll das gezielte Orientieren der Makromoleküle (bei definierter Temperatur der Folie), die eine Steigerung der Materialfestigkeit in Reckrichtung zur Folge hat, die Erhöhung des Isolationsschutzes (Verringerung der Durchlässigkeit von Gasen) und die Verringerung der Wanddicke (Finanzersparung) erzielt werden. Polymerfolien sind entweder in einer Richtung (monoaxial), was meistens mit einer unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeit der Abzugswalzen umgesetzt wird, oder in zwei Richtungen (zweiachsig) orientiert, siehe Abb. 5.21. Im Falle der Wiederaufwärmung der verlängerten Folien kommt es zur Reorientierung von Makromolekülen in die ursprüngliche Form, wodurch die Folie schrumpft.

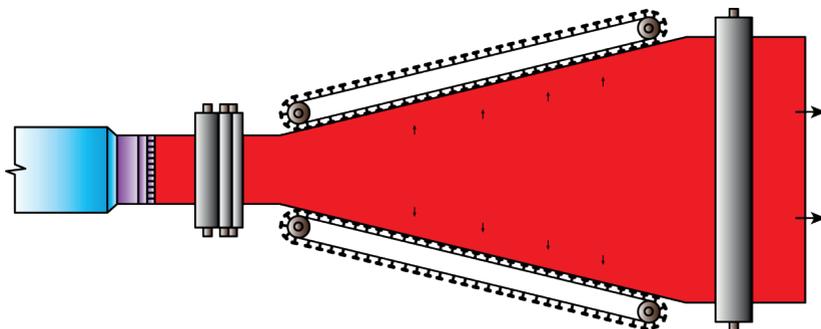


Abb. 5.21 Prinzip des zweiachsigen Folienreckens

Eine andere, sehr produktive Möglichkeit der Folienherstellung (einige Millionen Tonnen jährlich) ist die *Blasextrusion von Profilen in Form eines Rohrs*. Bei diesem Verfahren geht es um Extrusion eines Schlauches, was in seinem plastischen Zustand mit Druckluft aufgeblasen, von der Abzugsanlage verlängert (meistens wird ein oberer Abzug verwendet), abgekühlt und auf Walzen aufgewickelt wird (siehe Abb. 5.22). Vorteil dieses Verfahrens ist seine hohe Produktivität, die große Verdünnung des aufgeblasenen Schlauches und somit die Möglichkeit, sehr dünne Wände herzustellen (zweiachsig orientierung der Folie). Die Abmessungen der Folie können nur mit der Änderung der Prozessparameter geändert werden (keine Änderung der Anlagenausstattung). Die Nachteile sind dagegen die großen Raumanforderungen der Anlage (Höhe bis 15 Meter) und der große Aufwand bei der Qualifizierung des Bedienungspersonals. Die finalen Eigenschaften der Folie, ihre Abmessungen, die Orientierung der Makromoleküle und die Kristallisierung werden deutlich von den Prozessparametern, insbesondere der Extrusionsgeschwindigkeit, der Kühlung, dem Gasvolumen und der Abzugsgeschwindigkeit beeinflusst.



Abb. 5.22 Blasextrusion von Folien



Elektrostatický náboj se stává zdrojem řady nežádoucích jevů, např. Inutí polymerů ke zpracovatelským strojům, přitahování prachu, elektrostatického výboje, který způsobí ztrátu dat v paměti, nesprávné výstupy apod.

Für Herstellung eines Blasprofils werden meistens spezielle Querextruderköpfe (siehe Abb. 5.23) verwendet, die einen spiralförmigen Fluss der Schmelze in der Schlitzdüse bewirken. Durch die spiralförmige Verteilung der Schmelze werden Fließnähte, optischen Veränderungen und mechanischen Eigenschaften, die charakteristisch für die üblichen Querextruderköpfe sind, eliminiert.



Abb. 5.23 Extruderkopf für die Folienblasextrusion

Prozess der Blasfolienextrusion

Die Blasextrusion von Folien findet unter Druckluft zwischen 0,15 kPa – 1 kPa statt. Sie wird über den Druckkopf zugeführt. Das Volumen des verwendeten Druckmediums hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Abmessungen der Folie, der optischen Eigenschaften und der Orientierung der Makromoleküle. Bei einer Erhöhung des Gasvolumens kommt es zur Verringerung der Foliendicke, gleichzeitig jedoch auch zur Vergrößerung des aufgeblasenen Durchmessers und zur Erhöhung des Orientierungsmaßes von Makromolekülen.

Folienkühlung

Bei der Blasfolienextrusion wird die Folie sowohl von der äußeren als auch der inneren Seite mit Luft abgekühlt. Neben der Umgebungsluft kann auch gekühlte Luft oder „Sprühnebel“ verwendet werden. Die Auswahl der Methode und des Mediums hängt immer von den ökonomischen Bedingungen der Produktion ab.

Führung und Abzug der Folien

Ein weiterer wichtiger Faktor, der die Abmessungen und die Nutzeigenschaften der Folie beeinflusst, ist die Führung und der Abzug der Folie. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Foliendicke werden bei langen Strecken entlang des Blasprofils verschiedene Unterstützungen (meistens Walzen) aufgestellt, siehe Abb. 5.22. Diese Stützen verhindern die Veränderung der Form. Das ausgeblasene Profil wird zwischen den Platten abgeflacht und mit Abzugswalzen abgeschlossen. Sie sind für gewöhnlich mit einer elektrisch leitfähigen Gummischicht versehen, damit die elektrostatische Aufladung abgeleitet werden kann. Der Abzug der gekühlten Folie wird mit einer Walzenstrecke umgesetzt.

Die meist verwendeten Werkstoffe für die Blasfolienextrusion sind PE und PP. Diese Werkstoffe sind charakteristisch für ihre unpolaren Eigenschaften. Sie werden leicht elektrostatisch aufgeladen und sind schwer zu bedrucken. Daher ist es notwendig einen ergänzenden Arbeitsschritt, der diese ungewollten Erscheinungen eliminiert, einzugliedern. Veränderungen der Polarität der Folien werden meistens mit einer gezielten Oxidation ihrer Oberfläche oder mit Koronaentladung (Ionisierung der Luft mit Hochspannung) durchgeführt. Der nachfolgende Druck muss innerhalb weniger Tage nach diesem Schritt wirken.

5.4

Kabelextrusion

Die Extrusion wird auch für die *Ummantelung von Rohren, Leitern und Drähten* mit einem Durchmesser von 0,1 mm bis 10 mm verwendet. Ein Beispiel einer solchen Produktionslinie ist in der Abb. 5.24 gezeigt. Drähte, Leiter oder Rohre werden vor dem Eingang in den Extruderkopf vorgewärmt, wodurch eine bessere Adhäsion des Polymers sichergestellt wird und der Eintrag von Feuchtigkeit in den Herstellungsprozess verhindert wird. Der eigentliche Prozess der Ummantelung verläuft in den

Querextruderköpfen mithilfe eines Dorns, der sich standardweise aus zwei Hauptzonen zusammensetzt (die Beförderungs- und achssymmetrische Zone), siehe Abb. 5.25. Aufgabe der ersten Zone ist das Erreichen einer gleichmäßigen Verteilung der Schmelze (Veränderung des Schmelzflusses um 90°). Die zweite achssymmetrische Zone ermöglicht zuerst die Extrusion des Polymers zwischen Dorn und der Kopfummantelung (Druck ca. 50 MPa) und nachfolgend auch den eigentlichen Ummantlungsprozess, der Kontakt der Schmelze mit dem Leiter, dem Draht oder dem Rohr. Die ummantelten Gegenstände werden anschließend abgekühlt, indem sie durch ein Wasserbecken gezogen, abgezogen und aufgewickelt oder abgeschnitten werden. Bei den ummantelten Leitern werden in den Fertigungsprozess Kontrollstellen eingegliedert, welche Fehler detektieren und die Symmetrie und Dicke des ummantelten Profils kontrollieren. All diese Faktoren haben einen grundsätzlichen Einfluss auf die Qualität der aufgetragenen Isolierschicht. Ein sehr wichtiger Parameter ist dabei die Dicke der aufgetragenen Schicht, die nicht nur von den eingestellten Prozessparametern (Schneckendrehzahl und Temperatur der Schmelze) und der Konstruktion des Extruderkopfes abhängig ist, sondern auch von der Geschwindigkeit des Abzugs, den Drahtabmessungen und von dem verwendeten Material.

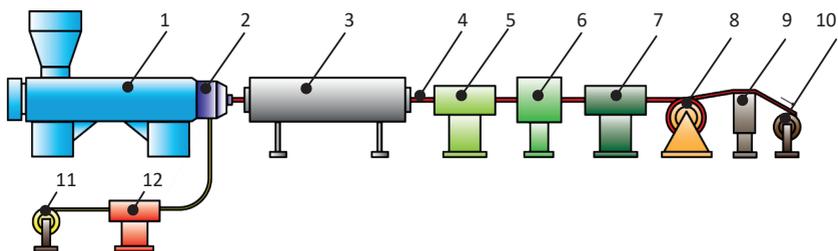


Abb. 5.24 Fertigungslinie für die Kabelextrusion

- 1 – Extruder; 2 – Extruderkopf; 3 – Kühlung; 4 – ummantelter Leiter; 5 – Kontrolle der Isoliereigenschaften; 6 – Kontrolle der Leiterabmessungen; 7 – Kontrolle der Exzentrizität;
 8 – Abzug; 9 – Endkontrolle; 10 – Aufwicklung des ummantelten Leiters;
 11 – Abwickelstation des Leiters; 12 – Vorerwärmung

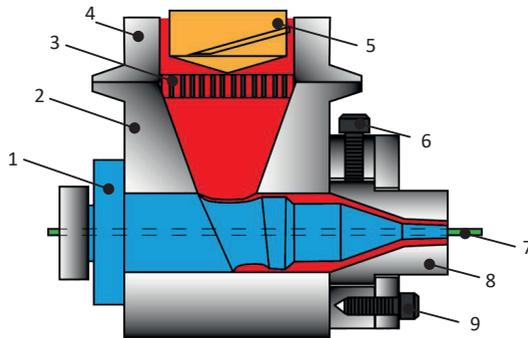


Abb. 5.25 Konstruktion des Extruderkopfes für die Leiterummantelung

- 1 – hohler Dorn; 2 – Grund- (Eingangs-)teil des Extruderkopfes; 3 – Brechelement;
 4 – Zylinder, Extruderkörpe; 5 – Schnecke; 6 – Korrektur der Extrusionskoaxialität;
 7 – ummantelter Draht; 8 – Formungsteil des Extruderkopfes;
 9 – Fixierung des Formungsteils (Schraube)

5.5

Coextrusion

Coextrusion ist eine Herstellungsmethode für Mehrschichthalbzeuge und Produkte, bei der es zur kontinuierlichen Extrusion und Formung mehrerer Werkstoffe gleichzeitig kommt, siehe Abb. 5.26. Die Coextrusion kann für alle vorstellbaren Technologien der Extrusion (Herstellung von Rohren und Profilen, Platten und Folien) angewendet werden. Gegenüber dem Standardprozess mit einem Extruderkopf werden bei der Mehrschichtextrusion (Coextrusion) mehrere Extrudereinheiten verwendet, von denen die Werkstoffe gleichzeitig in einen Extruderkopf extrudiert werden. Die Coextrusion hat sowohl ökonomische als auch qualitative Vorteile, da bei der Herstellung von Mehrschichtteilen für ihre Oberflächenschicht ein Material hoher Qualität mit entsprechenden mechanischen und Isolierenden Eigenschaften oder entsprechender chemischen Beständigkeit gewählt werden kann. Die mittleren Materialien können eine kostengünstigere Varianten sein (einschließlich Rezyklat). Für die Fertigung von Mehrschichtteilen können Werkstoffe mit guter gegenseitiger Adhäsion, aber auch mit schlechter Adhäsionskompatibilität verwendet werden, wenn ein geeignetes Adhärenzmittel verwendet wird.

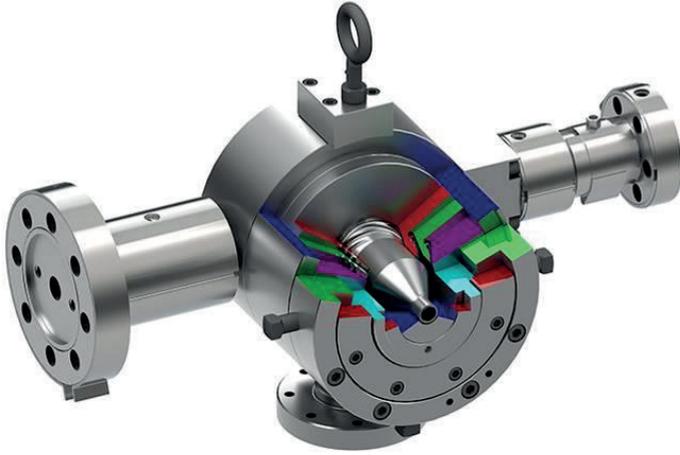


Abb. 5.26 Extruderkopf für die Coextrusion zur Herstellung von Rohren

Das **Blasformen** ist nach dem Spritzgießen und der Extrusion die meist verbreitetste Verarbeitungstechnik der Polymere. Es handelt sich um eine Niederdrucktechnologie, die zur Herstellung von oftmals geschlossenen Produkten mit dem Volumen von einigen Millilitern bis zu Großvolumenbehältern angewendet wird. Die Blasteile werden insbesondere in der Automobilindustrie, Verkehrs- und Verpackungsindustrie als Behälter für Flüssigkeiten, Kanister, zur Luftverteilung, Fässer und Flaschen genutzt. Weiterhin werden mit diesem Verfahren Spielzeuge, Elektronik, pharmazeutische Artikel sowie Gärtner-, Sport- oder Freizeitartikel (siehe Abb. 6.1) hergestellt. Das technologische Prinzip ist wie folgt: Plastifizierung von Material (Granulat), Herstellung der Vorformlinge (Extrusion oder Spritzguss), Formen des zähflüssigen Rohlings in der Blasform mit Hilfe von Luftdruck, Abkühlung und Entformen des Werkstücks.



Abb. 6.1 Beispiele für Produkte die durch das Blasformen hergestellt werden

Zu den **Hauptvorteilen** und den Gründen der breiten Anwendung vom Blasformen gehören vor allem:

- eine relativ günstige und einfache Fertigungsanlage, die zur Mittel- und Großserienherstellung geeignet ist,
- eine geringere Scherbelastung vom Material im Vergleich zur Spritzgusstechnik,

- Werkstoffe mit niedrigeren Festigkeitseigenschaften (Anwendung von leitenden Werkstoffen) können auch für das Blasformen verwendet werden,
- Herstellung von Mehrschichtprodukten.

Zu den **Hauptnachteilen** gehören dagegen:

- eine geometrische Begrenzung der Produktform,
- eine niedrigere Produktionsexaktheit im Vergleich zum Spritzguss.

Die Blastechnik kann grundlegend in zwei Methoden untergliedert werden: das *Extrusionsblasformen* und das *Spritzblasverfahren*. Beide Methoden unterscheiden sich voneinander in der Art und Weise der Herstellung des Halbprodukts. Es gibt jedoch auch spezielle Techniken für Teile mit komplizierten Formen. Sie werden in diesem Kapitel nicht weiter beschrieben.

6.1

Extrusionsblasformen

Das **Extrusionsblasformen** (siehe Abb. 6.2) verwendet eine komplexe Fertigungsanlage, welche die Herstellung des Rohlings durch Extrusion und gleichzeitigem Aufblasen, Abkühlen und das nachfolgende Entformen vom Fertigteil umfasst. Für das Extrusionsblasformen werden ähnliche Werkstoffe wie für die Extrusion verwendet (z.B. PVC-P, PE-HD, PE-LD, PP, PA, POM, PBT, PS und PC). Das meist verwendete Material, im Hinblick auf den niedrigen Preis und der guten Verarbeitungs- und Nutzeigenschaften, ist PE. Das Extrusionsblasformen ist ein sehr variabler Prozess, mit den Ein- oder Mehrschichtteile sowohl kleiner Abmessungen (Coextrusion, z.B. Flaschen für Kosmetik und Waschmittel, Spielzeuge usw.), als auch mittel große und Großvolumenprodukte (z.B. Kannen, Behälter, Fässer usw.) hergestellt werden können.

Rohling Herstellung

Die Herstellung eines Rohlings (Röhre, sog. *Vorformling*) geschieht beim Extrusionsblasformen über eine Extrudereinheit, die vergleichbar mit der für die Herstellung von Rohren ist. Das Material (Granulat) wird aus dem Trichter der Maschine in die Schmelzkammer mit Hilfe der Schnecke befördert, schrittweise zusammengepresst, aufgeschmolzen und homogenisiert. Ein Beispiel der empfohlenen Ausgangstemperaturen der Schmelze aus dem Extruder ist in der Tabelle 6.1 für ausgesuchte Poly-

mere angeführt. Am Eingang der Extrudereinheit ist ein einfacher oder mehrfacher Querextruderkopf mit einem axial beweglichen Dorn angeschlossen. Die Position des Dorns bestimmt die Lücke zwischen dem Dorn und dem Kopfkörper und bestimmt somit die Dicke des extrudierten Vorformlings. Sobald der Vorformling, der sich plastisch umformen kann, die geforderte Länge erreicht, wird es abgeschnitten (z.B. mit einem Heizdraht) und von dem Werkzeug eingeschlossen. Durch schließen des Werkzeugs wird der Mündungsbereich geformt und der Boden zusammengequetscht bzw. verschlossen. Nachfolgend wird Druckluft zugeführt und der Vorformling aufgeblasen.

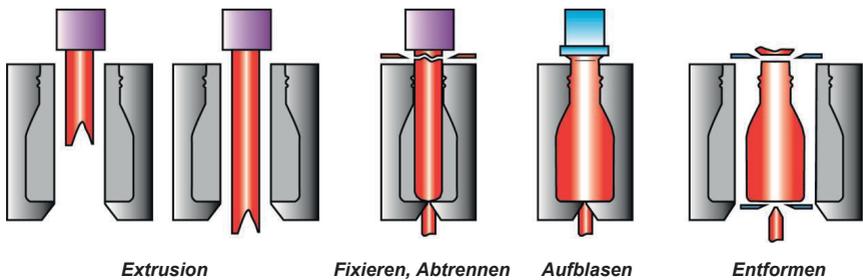


Abb. 6.2 Prinzip der Extrusion

Die Hauptproblematik der Extrusion des Halberzeugnisses ist die Koaxialität der Extrusion (siehe Abb. 6.3), die Vergrößerung des Profils in der Mündung des Extruderkopfes (Einfluss der Kompression des Materials) und seine Dehnung (unter Einfluss der Gravitationskräfte). Alle diese Aspekte beeinflussen die Gleichmäßigkeit der Dicke des Halberzeugnis und somit auch des finalen Produkts wesentlich.

Der Negativeffekt der Dehnung des Vorformlings zeigt sich insbesondere bei dickwandigen Teilen von größerem Volumen. Bei diesen Produkten wird daher keine klassische kontinuierliche Extrusion, sondern die *diskontinuierliche Extrusion* angewendet. Dabei wird das homogenisierte Material schrittweise vor der Schneckenfront oder in einem speziellen Speicherkopf (siehe Abb. 6.4) angesammelt. Nach der Plastifizierung einer ausreichenden Materialdosis folgt seine sehr schnelle Extrusion aus dem Extruderkopf mit Hilfe der axialen Bewegung der Schnecke oder des Kolbens in dem Speicher. Ergebnis ist eine gleichmäßigere Verteilung der Wandstärke vom Halberzeugnis in seiner ganzen Länge.

Tab. 6.1 Empfohlene Temperaturen der Schmelze

Material	Empfohlene Temp. am Extrusionsende
PE-HD	(200 bis 215) °C
PE-LD	(170 bis 200) °C
PVC	(160 bis 190) °C
PS	(180 bis 235) °C
PC	(240 bis 270) °C
PA 6.6	(270 bis 285) °C

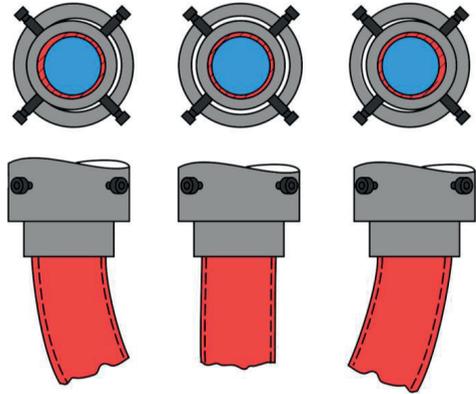


Abb. 6.3 Korrektur der Koaxialität bei der Vorformlingsextrusion

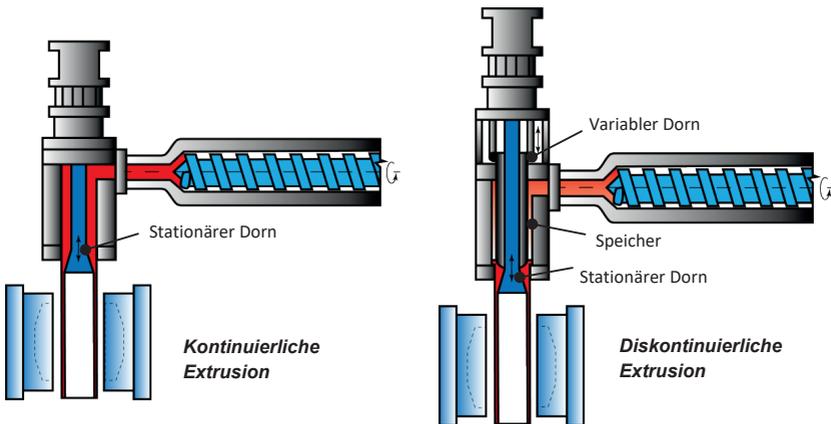


Abb. 6.4 Prinzip der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Extrusion

Blasformen des Vorformlings

Hauptaufgabe dieses Prozessschrittes ist die Sicherstellung einer schnellen und sicheren Formung des Rohlings in dem Werkzeug. Zu diesem Zweck wird Druckluft zwischen 0,2 MPa und 0,6 MPa verwendet. Die Druckluft wird standardweise in den Hohlraum des Vorformlings mit *Blasdüsen* zugeführt. Deren Aufgabe ist auch die Herstellung und Kalibrierung der Mündung (Gewinde) vom Produkt (z.B. Flaschen, Kanister, Fässer usw.), siehe Abb. 6.5. Eine weitere Möglichkeit der Druckluftzufüh-

rung ist die Anwendung einer weiteren oder mehrerer *Blasnadeln*. Die Blasnadeln werden für geschlossene Produkte oder Produkte mit einer sehr kleinen Öffnung, wie z.B. Kinderspielzeuge, Bälle usw. verwendet.

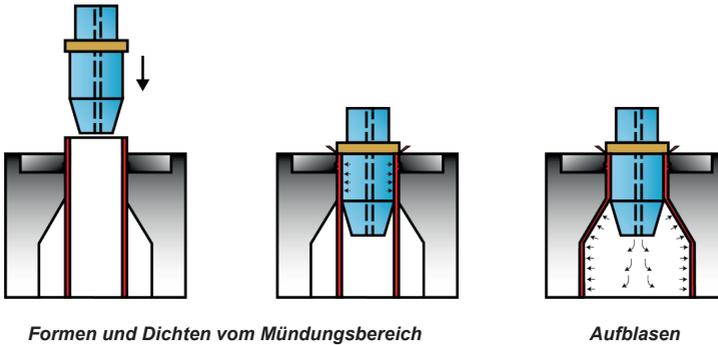


Abb. 6.5 Aufblasen der Vorformlinge mit den Düsen

Zum schnellen und problemlosen Formen der Vorformlinge, bei dem es zum 80 %igem Anwachsen seines Volumens kommen kann, und zur Erreichung der geforderten Produktqualität muss eine entsprechende Entlüftung des Werkzeugs sichergestellt werden. Bei kleineren Produkten, die eine unkomplizierte Form besitzen, genügt die Entlüftung in der Trennlinie. Bei komplizierten und größeren Teilen werden die Formen sehr oft mit Entlüftungsrillen oder -kanälen ergänzt, siehe Abb. 6.6.



Abb. 6.6 Einleger mit Entlüftungsrillen oder -kanälen

Kühlung des Produkts

Polymere sind im Allgemeinen schlechte Wärmeleiter, weshalb der Abkühlungsprozess der einschränkende Faktor für die Produktivität ist. In Abhängigkeit der Form, Größe, Dicke und dem verwendeten Material entspricht die Kühlzeit zehntel Sekunden bis Minuten, was 50 % – 90 % der Gesamtherstellungszeit entspricht. In der Aufblasphase wird die Wärme mit zwei voneinander abhängigen Kühlsystemen (äußeres und inneres Kühlsystem) abgeleitet. Als äußeres Kühlsystem wird eine Methode bezeichnet, bei der die Produktwärme durch den Übergang zwischen der Produktwand, Werkzeugwand und Kühlkanälen, in den das wärmetragende Medium zirkuliert, abgeleitet wird (siehe Abb. 6.7). Das innere Abkühlsystem ist ein System zur Sicherstellung der Wärmeübertragung der inneren Teile hohler Produkte durch Strömung des Gasmediums. Miteinander verglichen ist das äußere Kühlsystem effizienter. Grund ist die schlechte thermische Leitfähigkeit des Gases (Kühlmedium), was normalerweise Luft mit Umgebungstemperatur ist. Deswegen wird ein großer Wert auf den richtigen Entwurf des Kühlsystems der Blasform gelegt.

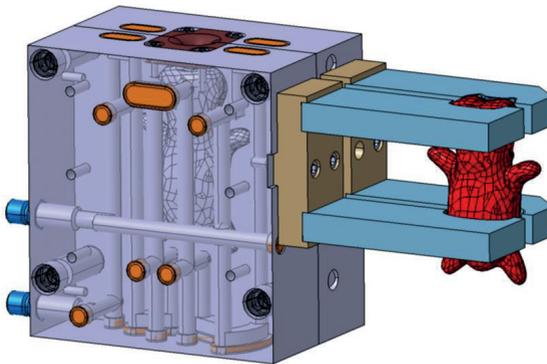


Abb. 6.7 Beispiel des äußeren Kühlsystems eines Blaswerkzeugs

Da die Kühlphase die meiste Zeit vom Fertigungsprozess in Anspruch nimmt und somit die Produktivität der Produktion beeinflusst, werden in der Praxis Lösungen umgesetzt, die diese Produktivität erhöhen. Die einfachste Lösung ist die Verwendung von zwei wechselnden Werkzeugen, bzw. eines horizontal und eines vertikal rotierenden Blasrades. Diese Methode, bei der eine Vielzahl von Werkzeugen ver-

wendet wird, ermöglicht einen Produktionszyklus von nur wenigen Sekunden, siehe Abb. 6.8.

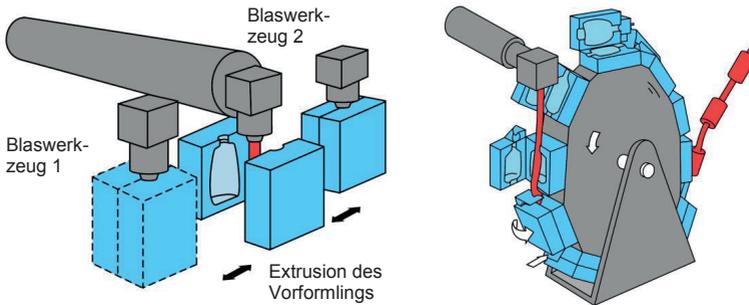


Abb. 6.8 Extrusionsblasformen mit beweglichen Formen

Entformung und Abschneiden des Produkts

Ein sehr wichtiger Prozessschritt, der dem Entformen vom Produkt vorangeht, ist die Einhaltung ausreichender Zeit zur Ableitung der Druckluft, mit der das Produkt geformt wurde. Es könnte sonst zum Herunterwerfen des Produkts von den leitenden Elementen, zu seiner Verkeilung in der Werkzeughöhhlung und auch zur Beschädigung kommen. Der eigentliche Entformungsprozess ist bei der Blastechnik sehr einfach, da er durch die Schwindung vom Material unterstützt ist. Dadurch löst sich das Produkt von der Wand der Form ab. Zur Entformung werden so keine spezielle Mechanismen (Auswerfstifte, Flachausstoßer, Ringe usw.), wie beim Spritzgießen benötigt.

Extrusionsblasformmaschinen

Die Extrusionsblasformmaschinen können, je nach Anforderungen auf ihre Produktivität und Eigenschaften des Endprodukts, in mehrere Kategorien untergliedert werden, siehe Tab. 6.2.

Tab. 6.2 Grundaufteilung der Extrusionsblasformmaschinen

Typ	Anwendung, Bemerkungen
Kontinuierliche Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinere Produkte mit kleinen Wanddicken • Problematik der Vorformlingsdehnung
Mit Schiebebewegung des Werkzeugs	<ul style="list-style-type: none"> • Standardanlage • Geeignet für mittlere und größere Serien
Rotierendes Blasrad	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Produktivität der Fertigung • Geeignet für große Produktionsserien
Diskontinuierliche Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Große Produkte mit großen Wanddicken • Eliminierung der Problematik der Vorformlingsdehnung
Mit Schiebbewegung der Schnecke	<ul style="list-style-type: none"> • Selten verwendet • Geeignet für mittlere, größere und große Serien
Akkumulator	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr oft gebraucht • Geeignet für mittlere, größere und große Serien

6.2

Spritzblasverfahren

Spritzblasverfahren ist eine weitere Alternative für die Herstellung von Hohlkörpern, bei der das Halbprodukt, der Vorformling (sog. Preform) durch Spritzgießen hergestellt wird. Vorteil des Streckblasens ist, dass kein technologischer Abfall entsteht, wenn beim Spritzgießen der Preformen heiße Düsen (aufgeheizte Angüsse) verwendet werden, das Produkt hat keine Naht, der Boden und der Mündungsbereich haben eine hohe Qualität, es entfällt die Problematik der Dehnung des Vorformlings und die Koaxialität der Extrusion. Zu den Nachteilen gehört dagegen die Notwendigkeit, zur Verwendung von zwei Werkzeugen (Spritzgieß- und Aufblaswerkzeug), der Kunststoff muss sowohl für das Aufblasen, als auch für das Spritzgießen geeignet sein, die Größe der Produkte ist durch die Größe des Vorformlings begrenzt und die Fertigungsanlage ist komplizierte und teuer. Die am meisten verarbeiteten Werkstoffe sind PET, PVC, PE, PC und PA. Die Fließigenschaften dieser Werkstoffe unterscheiden sich von denen, die für das Spritzgießen verwendet werden. Aus ökonomischer Sicht wird diese Technologie vor allem für die Großserienherstellung von Teilen der Verpackungsindustrie, insbesondere von PET Flaschen mit einem Volumen von 0,125 Liter bis 2 Liter verwendet.

Rohling Herstellung

Wie schon erwähnt, wird bei dem Spritzblasverfahren für die Herstellung des Vorformlings nicht die Extrusion, sondern das Spritzgießen verwendet. Das Material wird in der Spritzeinheit geschmolzen, homogenisiert und unter hohem Druck in die Werkzeughöhlungen eingespritzt, die durch Matrize (Dorn) und Kavitäten gebildet sind. Als Halbzeuge entstehen halbgeschlossene Behälter (Preformen) die einen fertigen Mündungsbereich mit Gewinde von hoher Qualität (exakte Maße) besitzen, siehe Abb. 6.9. Laut Konstruktionsentwurf des Werkzeugs kann die Wanddicke der Preformen gleichmäßig oder auch veränderlich sein (im Bodenbereich des zukünftigen Fertigprodukts verstärkt). Die veränderliche Wanddicke der Preform ermöglicht bei abgestuften Produkten eine gleichmäßige Wanddicke, eine bessere Optik und eine höhere Steifigkeit. Ein großer Vorteil dieser Fertigungsmethode ist seine hohe Produktivität (z.B. durch 70 fach Werkzeuge).



Abb. 6.9 Beispiel eines Vorformlings und Werkzeugs für Produkte der Spritzblastechnik

Spritzblasen der Preformen

Das Formen ist bei dem Spritzblasverfahren ähnlich wie bei dem Extrusionsblasen. Das Produkt muss schnell und sicher geformt werden. Für die Zuführung der Druckluft in die Werkzeughöhlung werden Blasdorne verwendet (ohne Funktion der Halskalibrierung). Die Druckluft wird mit einem Druck von 1 MPa bis 1,2 MPa zugeführt. Es handelt sich also um etwas höhere Druckwerte als beim Extrusionsblasen, die das bessere Kopieren der Wände der Blasform und somit eine bessere Qualität der Produktoberfläche ermöglichen.

Entformung und Kühlung des Produkts

Die Kühlung und Entformung der Halb- und Endprodukte ist ähnlich wie beim Spritzgießen und Extrusionsblasen. Die Vorformlinge werden aus der Matrize mit einem Flachausstoßer ausgeworfen (entformt).

Spritzblasmaschinen

Das Spritzblasverfahren nutzt zwei Prozesseinheiten (Spritzeinheit und Blaseinheit), die Bestandteil einer Fertigungsstelle (Ein-Stufen-Verfahren), oder ganz abgetrennt (Zwei-Stufen-Verfahren) sein können. Das Ein-Stufen-Verfahren sieht folgenderweise aus: das Halbprodukt wird gespritzt, einschließlich Boden und Mündungsbereich mit Gewinde (die Schmelze wird auf eine Matrize – Spritzdorn der Form eingespritzt), solange das Material noch plastisch ist, wird der Dorn mit dem Vorformling in die Blasform transportiert, wo es mit Druckluft geformt (Aufblasen) wird, darin Erstarrt und nach dem Öffnen der Form das Endprodukt ausgeworfen wird. Es gibt mehrere Methoden zur Versetzung des Vorformlings zwischen der Spritz- und der Blaseinheit (Piotrowsky, Farcus, Moslo, Gussoni Methoden). Die meist verbreitete Methode zur Einordnung und Umstellung des Vorformlings ist die Gussoni-Methode, bei der die Arbeitsstationen (Spritzgießen, Aufblasen und Entformen) um 120° gedreht angeordnet sind, siehe Abb. 6.10.

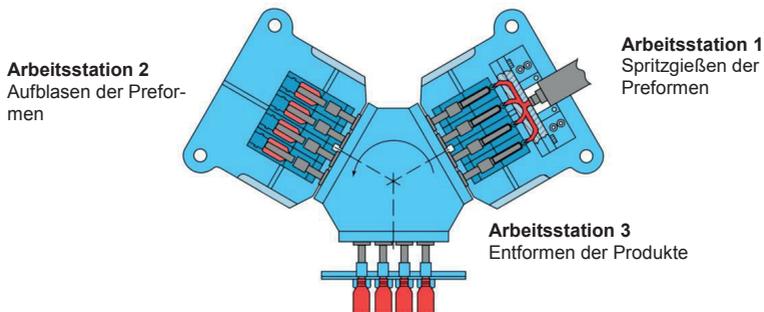


Abb. 6.10 Gussoni-Methode der Versetzung von Vorformlingen (Preformen)

Bei dem Zwei-Stufen-Verfahren werden die Vorformlinge an einer üblichen Spritzgießmaschine hergestellt. Nach der Kühlung folgt das Versetzen (z.B. in ein anderes Produktionswerk), die Erwärmung (der Mündungsbereich mit dem Gewinde des

zukünftigen Produkts wird nicht aufgewärmt) und das Formen in der Blasmaschine, siehe Abb. 6.11. Bestandteil der Blasmaschinen ist also nicht nur die Blaseinheit, sondern auch die Anlage zur Aufwärmung der Preformen. Je nach Ausmaß der Automatisierung können die Spritzblasmaschinen in halbautomatische (manuelles Einlegen der Preformen, ca. 800 Flaschen pro Stunde) und vollautomatische (ca. 1 500 Flaschen pro Stunde) Maschinen gegliedert werden. Vollautomatische Maschinen können weiterhin in kontinuierliche (8 und mehr Hohlräume) oder diskontinuierliche (40 und mehr Hohlräume) Maschinen aufgeteilt werden. Die größte Produktivität der Herstellung (ca. 80 000 Flaschen pro Stunde) wird bei den kontinuierlichen, horizontal oder vertikal rotierenden Blasträdern erreicht. Diese Maschinen finden heute bei der Produktion von 80 % der auf dem Markt befindlichen PET Flaschen, Anwendung.



Abb. 6.11 Halbautomatische und vollautomatische Spritzblasmaschinen

Das Ein-Stufen-Verfahren bietet eine große Komplexität der Produktion (energetische Einsparung), das Zwei-Stufen-Verfahren hat dagegen eine höhere Produktivität, bessere Kontrolle der Vorformling-Temperatur und somit auch eine bessere Gleichmäßigkeit bei der Verteilung der Wanddicke.

6.3

Streckblasen

Aus der Sicht der Produktionswirtschaftlichkeit (Materialpreis und Produktivität der Produktion) gehören die erreichbare Mindestdicke und ihre gleichmäßige Verteilung zu den wichtigsten Faktoren. Sie haben zur Anwendung des **Streckblasens** geführt.

Das Prinzip dieses Verfahrens ist das Strecken des Vorformlings vor seinem eigentlichen Blasvorgang. Das hat nicht nur die Gleichmäßigkeit der Wanddicke zur Folge, sondern beeinflusst auch die Orientierung der Polymermakromoleküle, die positive Einwirkung auf die Erhöhung der Festigkeit und Steifigkeit des Teils in der Richtung der Orientierung und die Durchlässigkeit für Gase und Dämpfe wird vermindert (erhöht den Barrierenschutz des Produkts). Das Streckblasen kann für beide Blasmethoden (Spritz- als auch Extrusionsblasen) angewendet werden, wird jedoch meistens beim Spritzblasverfahren, z.B. für die Herstellung von PET-Flaschen verwendet, siehe Abb. 6.12.

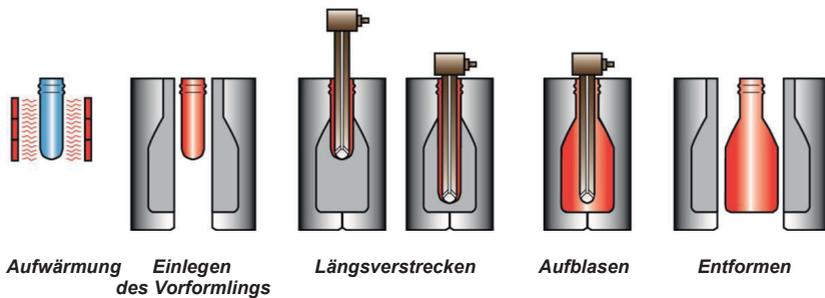


Abb. 6.12 Beispiel des Streckblasens beim Zwei-Stufen-Spritzblasverfahren

Eine weitere Herstellungsmethode für Hohlkörper aus Polymeren ist das **Rotationsformen**. Bei diesem Bearbeitungsverfahren befindet sich eine bestimmte Menge von Polymerpulver in einer zweiseitigen Metallform. Die Form wird zunächst geschlossen und nachfolgend in eine rotierende Kammer zwischen zwei sich gegenüberstehenden Achsen gesetzt. Dabei wird die Metallform gleichzeitig von außen erwärmt. Dank der Rotation wird das Pulver gleichmäßig verteilt, angeschmolzen und somit auf der inneren Formoberfläche angelagert.

Das Ergebnis ist eine monolithische Kunststoffschicht mit einer Dicke von 1,5 mm bis 30 mm. Die Metallform mit der Kunststoffschicht innen wird nun von außen abgekühlt (Kühlungsphase). Nach ausreichender Abkühlung kann das Produkt aus der Form herausgenommen werden. Sowie bei dem Extrusionsblasen als auch beim Rotationsformen ist das meist verwendete Material PE (85 % – 90 % der Gesamtproduktion). Zu den weiteren Werkstoffen gehören PVC-P (bis zu 12 % der Gesamtproduktion), PC, PA, PP und ABS. Neben diesen Standardmaterialien sind auch Compositwerkstoffe und sog. „high-tech“ Polymere (sehr effizient), wie z.B. PEEK bekannt. Damit können sehr stabile Teile für bspw. die Flugzeugindustrie und für Sportfahrzeuge hergestellt werden. Hauptsächlich werden mit dem Verfahren des Rotationsformens Produkte für die Bereiche der Bauwirtschaft, der Automobilindustrie und der Medizin, wie Kunststoffbehälter, Fässer oder Wassertanks hergestellt. Auch Produkte der Spielzeugindustrie, für Freizeitaktivitäten und Designteile, wie z.B. Kunstgegenstände, bilden eine große Gruppe. Das Rotationsformen findet so eine breite Anwendung quer über das Industriespektrum, siehe Abb. 7.1. Unter Berücksichtigung aller Fertigungsbeschränkungen ist die Effektivität deutlich niedriger als bei anderen Verfahren wie z.B. Spritzgießen, Extrusion, Blastechnik oder bei Thermoformen von Polymeren.

Zu den **Hauptvorteilen** vom Rotationsformen gehören insbesondere:

- Herstellung von Hohlteilen, die als ein Stück hergestellt werden, d.h. ohne Schweiß- oder andere Verbindung,
- atmosphärischer Druck beim Formen (Herstellung von Teilen ohne Innenspannung),

- auch Werkstoffe mit niedrigerer Festigkeit können verwendet werden,
- niedrige Produktionskosten (demnach geeignet für Kleinserien- als auch Prototypproduktion),
- schneller Weg vom Entwurf zur Umsetzung des Produkts (einfache Formen),
- Waste-free- Verfahren (bei richtigem Materialeinsatz),
- einfache Herstellung von Teilen mit einem Volumen von $> 2 \text{ m}^3$,
- Wechseleinsätze in der Form.

Zu den **Hauptnachteilen** des Verfahrens dagegen gehören:

- lange Produktionszeit (niedrige Produktivität),
- Beschränkungen bezüglich der Form der Erzeugnisse,
- begrenzte Möglichkeiten bei der Materialwahl,
- niedrigere Ausmaßexaktheit der Produkte (im Vergleich zu Spritzgießen und Blasverfahren).



Abb. 7.1 Beispiele der durch Rotationsformen hergestellten Produkte

Der eigentliche Arbeitsprozess kann in fünf Hauptphasen unterteilt werden: **Dosierung, Erwärmung und Formen des Materials, Abkühlung und Entformen des Teils**. Ein Beispiel für den Aufbau eines Rotationsformarbeitsplatzes ist in der Abb. 7.2 angeführt.

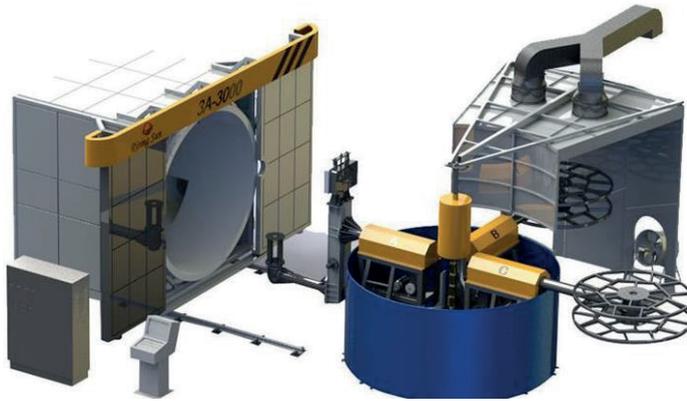


Abb. 7.2 Beispiel der Anordnung einer Rotationsformen-Arbeitsstelle

7.1

Materialdosierung

Die Materialdosis ist für das Rotationsformen eine grundlegende Frage. Die Materialmenge bestimmt die erreichbare Wanddicke des Teils, die notwendige Zeit zum Erwärmen und zum Abkühlen des Materials und die Produkteigenschaften. Meistens wird mit einem Verhältnis von 350 g Material auf 1 m³ des Produktvolumens gearbeitet.

7.2

Material- und Formerwärmung

Die Erwärmung von dem Material, bzw. der rotierenden geschlossenen Form erfolgt in einem elektrisch aufgeheizten Ofen. Durch das Durchdringen der Wärme durch die Formwand, wird das Material erwärmt (im Innenraum herrscht ein atmosphärischer Druck). In Folge wird das Material allmählich aufgeschmolzen. Zunächst kommt es zur Aufschmelzung der Materialschicht in der Nähe der Formwände. Aufgrund des kontinuierlichen Zuflusses der Wärmeenergie, dringt die Wärme tiefere Schichten des Materials ein, bis zu dem Moment, in dem die ganze Materialdosis aufgeschmolzen ist. Neben der passenden Temperatur, die höher als die Schmelztemperatur des Polymers sein muss, ist auch die Dauer der Erwärmung

sehr wichtig. Die empfohlenen Temperaturen und Zeiten der Erwärmung von Aluminium-Formen (der am häufigsten verwendete Formwerkstoff dieser Technologie) für ausgesuchte Polymere sind in der Tab. 7.1 angeführt. Diese Werte sind sehr oft nur empirische Werte, die nur für einen engen Produktionsbereich (spezifisches Material und Konstruktion der Form, Ofentyp usw.) anwendbar sind.

Tab. 7.1 Empfohlene Temperaturen für die Form erwärmung

Material	Wanddicke v. Teil [mm]	Ofentemperatur [°C]	Erwärmungszeit [min]
PE-HD	2	300	13
	4		23
	6		32
	8		43
	10		56
PP	3	325	18
PC	3	375	22
PVC	5	200	23
ABS	3	350	17
PA 6.6	3	325	16
PFA	3	330	33

7.3

Formen des Teils – Rotation der Form

Durch den gleichzeitig ablaufenden Prozess der Erwärmung (Aufschmelzen) des Materials und der mehrachsigen Rotation (siehe Abb. 7.3) entsteht die Form des Produktes. Ein sehr wichtiges Ziel bei dem Formen ist das Erreichen von einer gleichmäßigen Wanddicke. Entscheidend dabei ist vor allem die Wahl der Rotationsgeschwindigkeit. In der Praxis liegt die Rotationsgeschwindigkeit am häufigsten zwischen 4 und 20



Abb. 7.3 Beispiel einer mehrachsigen Rotationsanlage

Drehungen/Minute, also relativ langsam. Der konkrete Wert hängt von dem verwendeten Material ab (seinem schüttfähigen Gewicht, der Werkzeug-, bzw. Teilform, aber auch von der Rauigkeit der Formoberfläche).

7.4

Materialabkühlung

Durch die Wärmedurchlässigkeit der Form kann das Material am Ende des Prozesses leicht abgekühlt werden. Die Form wird von außen mit einem Luftstrom, durch Injektion von Wassertropfen oder mit Sprühnebel gekühlt. Insbesondere die Injektion von Wassertropfen ist eine sehr effektive Methode, die jedoch nicht für alle Fälle geeignet ist, da sich die einseitige intensive Ableitung der Wärme negativ auf die Gleichmäßigkeit der Kristallinität (gilt für semi-kristalline Polymere) auswirkt und zur Teildeformation führen kann. In der Praxis wird daher sehr oft das Sequenzkühlen (durch Druckluft und Sprühnebel) verwendet. In einigen Fällen ist die Abkühlung mit Stationärluft notwendig. In solchen Fällen kann die Abkühlungszeit bis zu mehrere zehn Minuten betragen.

7.5

Entformung des Teils

Ähnlich wie beim Blasformen ist der Prozess der Formlösung des fertigen Teils nicht schwierig. Das Produkt löst sich von den Formwänden wegen eigener Schwindung selbst ab und kann nach dem Öffnen der Form leicht entnommen werden. Etwas komplizierter ist der Löseprozess bei großen Formen. In solchen Fällen sind Stützen zu verwenden, um die ungewollte Beschädigung des Produkts durch Ausfallen zu verhindern.

Thermoformen ist ein Verarbeitungsprozess der thermoplastischen Halbzeuge, bei dem es durch das Einwirken von Wärme und Druck zu einer Formveränderung kommt. Als Halbzeuge werden Platten oder Folien mit einer Materialdicke von 0,2 mm bis 16 mm verwendet. Typische Produkte des Verfahrens kommen z.B. aus der Verpackungs-, Spielzeug- und der landwirtschaftlichen Industrie und weiterer industrieller Abzweigungen, siehe Abb. 8.1. Durch Thermoformen kann man fast alle Thermoplasten, auch diese, die mit versteifenden Fasern gefertigt wurden, meistens PS, ABS, PE, PP, PET, PVC, PC, PMMA, PA und POM, bearbeiten. Somit können die durch Extrusion hergestellten Einschicht- und Mehrschichtplatten (Co-extrusion) geformt werden.



Abb. 8.1 Beispiele der mit Thermoformen hergestellten Produkte

Zu den **Hauptvorteilen** und Gründen der breiten Anwendung dieser Technologie gehören insbesondere:

- hohe Produktivität – kurze Produktionszeit,
- für kleine, als auch große Produktionsserien geeignet,
- Möglichkeit zur Produktion von Großvolumenteilen mit den Flächen $> 4 \text{ m}^2$ und Gewicht $> 125 \text{ kg}$,
- Produktion von Dünnwandteilen (schon ab einer Wandstärke von 0,05 mm),
- niedrigere Formdrücke,
- relativ niedriger Preis der Fertigungsanlage (im Vergleich zu dem Spritzgießen),

- Verarbeitung von Mehrschichthalbzeugen.

Zu den **Hauptnachteilen** dagegen gehören:

- Einschränkung der Konstruktion – Hinterschnitte,
- ungleichmäßige Wandstärke der Teile,
- schlecht überwachbare Temperatur des Halbzeuges,
- höherer Preis der Halbzeuge,
- großer Produktionsabfall (bis zu 80 %) – Beflammung.

Der eigentliche Verarbeitungsprozess kann in vier Grundphasen eingeteilt werden:

Erwärmung, Formung, Abkühlen und Abschneiden des Halbzeuges.

8.1

Erwärmung des Halbzeuges

Bevor das Halbzeug erwärmt wird durchläuft es (je nach Werkstoff und Formentechnik) die Phasen der Trocknung, Zuschnitt Herstellung, Einlegung und Verdichtung des Halbzeuges in dem Spannrahmen der Maschine. Alle diese Arbeitsschritte können die Qualität des Endprodukts beeinflussen. Die grundlegende Phase hier ist jedoch die Erwärmungsphase. Durch die Erwärmung wird z.B. die Gleichmäßigkeit der Wandstärke des Produktes, die Materialschwindung, seine Deformationsfähigkeit, Kopierung der Formoberfläche usw. beeinflusst. Grundaufgabe der Erwärmung ist das Erreichen einer raschen und gleichmäßigen Erwärmung der Platte bzw. der Folie auf eine Temperatur, bei der sich der Werkstoff in einem thermodynamischen Zustand befindet und somit gut geformt werden kann. Bei amorphen Kunststoffen befinden sich die Formungstemperaturen zwischen der Glasübergangstemperatur (T_g) und der Viskositätstemperatur (T_f). Bei teilkristallinen Kunststoffen liegen sie im unmittelbaren Bereich unter der Schmelztemperatur (T_m). Beispiele der Formungstemperaturen für die ausgesuchte Gruppe von Polymeren sind in der Tab. 8.1 angeführt. Konkrete Temperaturwerte sind allerdings von dem verwendeten Material und von der Wandstärke des Halbzeuges, der Formungstechnik und der Teilkonstruktion abhängig. Die Verwendung von höheren Formungstemperaturen verbessert das Formen selbst und auch das Kopieren der inneren Werkzeugkontur, während eine höhere Temperatur des Halbzeuges es ermöglicht, bei niedrigeren Formdrücken zu arbeiten. Auf der anderen Seite erhöht sich mit höherer Temperatur auch die Gefahr der Materialverstreckung durch den Einfluss der

Gravitationskraft. Dieser Effekt ist insbesondere bei dickwandigen Halbzeugen zu beachten. Noch komplizierter ist die Problematik der Erwärmung von Mehrschicht- und Composithalbzeugen. Bei ihnen muss die unterschiedliche Temperaturausdehnung und die Leitfähigkeit der Materialschichten berücksichtigt und ihre Delamination verhindert werden. Des Weiteren muss bei der Erwärmung von Halbzeugen mit mikroporöser Struktur (durch physikalische oder chemische Treibmittel hergestellt) darauf geachtet werden, dass sich die inneren Hohlräume nach der Formung nicht wieder verbinden. Das würde die Produktqualität negativ beeinflussen.

Tab. 8.1 Empfohlene Temperaturen der Formung für ausgesuchte Thermoplaste

Material	Empfohlene Formungstemperatur [°C]	Formungsbereich möglich zwischen [°C]
PP	155	130 - 165
PP + 40GF	200	130 - 230
PE-HD	145	130 - 180
PS	150	130 - 180
ABS	165	130 - 180
PVC	140	104 - 155
PMMA	180	150 - 195
PET	150	120 - 165



Abb. 8.2 Beispiele der Erwärmung von Halbzeugen

Neben der entsprechenden Temperatur des Halbzeuges ist es auch wichtig eine gleichmäßige Erwärmung der Fläche und Dicke sicherzustellen. Die gleichmäßige Erwärmung ist vor allem von dem verwendeten Heizsystem und der Wandstärke des Halbzeuges abhängig. Es ist jedoch auch mit Abkühlungserscheinungen in den Ecken als Folge des Temperaturwechsels zwischen dem Halbzeug und dem Fixierungsrahmen der Maschine zu rechnen. Zum Erreichen der gleichmäßigen Erwärmung des Halbzeuges werden moderne Heizsysteme in mehrere Zonen mit eigener Temperatursteuerung aufgeteilt, siehe Abb. 8.2. Um eine gleichmäßige Erwärmung der Materialwand zu erreichen, ist es günstiger bei den dickwandigen Halbzeugen eine beidseitige Erwärmung anzuwenden. Bei dünnwandigen Halbzeugen (in der Regel bis 3 mm) reicht die einseitige Erwärmung.

Zu den meist verwendeten Anlagen für die Erwärmung gehören:

- *Keramische und °Quartz“-Paneele*, die eine gleichmäßige Erwärmung des Halbzeuges ermöglichen und für Zonenheizung geeignet sind,
- *Induktionspaneele*, die geforderte Temperaturen in kurzer Zeit erreichen und einen ökonomischen Betrieb anbieten,
- *Widerstandsdrahtwicklung Chrom-Nickel*, die auf Grund des niedrigen Beschaffungspreises sehr oft verwendet wird, jedoch eine instabile Erwärmung aufweist und höhere Betriebskosten hat,
- *„Quartz“-Rohre*, die für die „oberseitige“ Erwärmung geeignet, jedoch sehr zerbrechlich sind.

Bezüglich der Erwärmung kann man behaupten, dass die teilkristallinen Thermoplasten für ihre Erwärmung mehr Energie als die amorphen Thermoplasten benötigen. Deswegen ist auch die benötigte Zeit für die teilkristallinen Thermoplasten länger. Die Erwärmung von dickwandigen Platten findet meistens an einer, höchstens an zwei Stellen statt und kann bis zu mehreren Minuten dauern. Die Erwärmung von dünnwandigen Folien ist standardweise kontinuierlich und erfolgt in wenigen Sekunden.

Das Formen ist ein Prozess, bei dem die Massenpartikeln nur wenig umgesetzt werden und deswegen ist der Formungsdruck viel kleiner als bei den anderen Verarbeitungstechniken (z.B. Spritzgießen, Extrusion usw.). Je nach Produktmaterial und angewandeter Technik werden die Formungskräfte entweder mechanisch oder pneumatisch mit Vakuum, Überdruck oder durch ihre Kombination hervorgerufen. Diese Kräfte wirken während des kompletten Vorganges, auch während der Abkühlungsphase, durchgehend auf die Teile, sodass es nicht zu Deformationen kommt.

Mechanisches Formen

Es handelt sich um eine technologisch einfache und günstige Methode des Formens in Zweiteilformen, die aus einer Matrize und einer Kavität bestehen. Daher können sehr hohe Formdrücke (die höchsten von allen Formungsverfahren) ermöglicht werden. Dank der Fähigkeit des Materials die Formkontur (Narbung, Schrift usw.) sehr gut kopieren zu können, werden ausgezeichnete äußere Eigenschaften des Teils sichergestellt. Nachteil dieses Verfahrens ist die deutliche Verdünnung der Wand des Halbzeugs und die langsame Geschwindigkeit des Formens. Es ist insbesondere für dickwandige Produkte mit kleinen Tiefen geeignet. Zu den typischen Produkten gehören z.B. Spoilers, Lastwagendächer, Landwirtschaftstechnik usw.

Pneumatisches Unterdruckformen (Vakuumformen)

Das Vakuumformen gehört dank der schnell hergeleiteten Formungskraft, Wirtschaftlichkeit und Produktivität zu den meist verwendeten Methoden des Formens. Neben der Erwärmung spielt hier auch die Verdichtung vom Halbzeug eine wichtige Rolle. Die erreichbare Formungskraft ist sehr begrenzt. Das Verfahren ist für die Formung von dünnwandigen Teilen geeignet. Zu den charakteristischen Produkten gehören verschiedene Verpackungen, z.B. Becher und Dosen in der Nahrungsmittelindustrie. Das Vakuumformen kann weiterhin in das Formen im *negativ* oder *positiv*, bzw. Formen ohne oder mit *Vorformung (mechanisch, pneumatisch oder kombiniert)* aufgeteilt werden, siehe Tab. 8.2.

Pneumatisches Überdruckformen

Die Änderung der Halbzeugform wird mit dem Überdruck (Druckluft von 1 bis 2 MPa) initiiert. Dank der höheren Drücke ist dieses Verfahren für dickwandige Halbzeuge (mit der Stärke von ≥ 10 mm) oder Kunststoffe, die schlecht zu formen sind (PVC, PC), gut geeignet. Die Produkte besitzen sehr gute Oberflächeneigenschaften. Die Halbzeuge können die Konturen, Logos und Narbungen leicht abdrücken, und man kann glatte mit genarbten Oberflächen kombinieren. Sehr wichtig ist die Ableitung der Luft zwischen dem geformten Halbzeug und der Formhöhlung. Zu den typischen Produkten gehören bspw. Koffer, Werkzeugkisten usw.

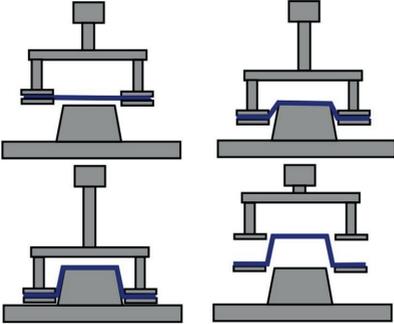
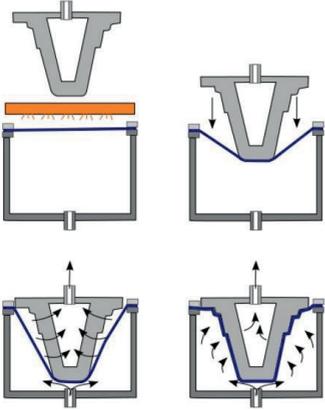
Kombiniertes pneumatisches Formen

Die Unterdruck- und Überdruckformungsmethoden werden sehr oft kombiniert. Der Grund ist die Bemühung um Gleichmäßigkeit der Wandstärken und Erhöhung ihrer erreichbaren Tiefe. Diese Parameter sind oft limitierende Faktoren von dem Fertigungsverfahren.

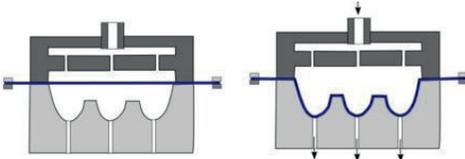
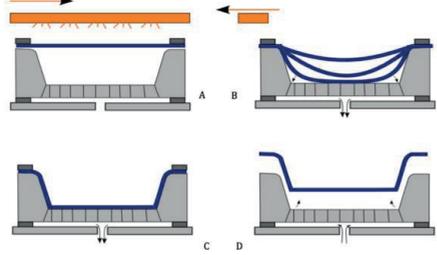
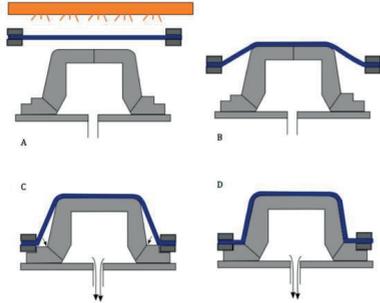
Neben dem Formdruck sind für den Fertigungsprozess auch weitere Faktoren, wie Form und Abmessungen des Werkzeuges, Entformungsschrägen, Hinterschnitte, Radien, Methode der Entlüftung vom Werkzeug usw. wichtig. Vor allem muss die Form mit Absauglöchern ausgestattet sein, die den Hohlraum der Form unter dem geformten Halbzeug mit dem Vakuumspeicher und der Absauganlage verbinden. Das Werkzeug kann gegenüber dem Produkt entweder in einer positiven Position (Formen auf die Matrize) oder in einer negativen Position (negatives Formen in die Kavität der Form) stehen. Charakteristisch für die durch Formen hergestellten Teile ist die Verdünnung der Wandstärke im Bodenbereich. Dieses Verfahren ist insbesondere für Teile mit kleinerer Tiefe geeignet. Das Formen in positiver Position ermöglicht das Erreichen von größeren Tiefen vom Produkt. Im Bodenbereich befindet sich die stärkste Wand. Für den Mechanismus der Verdünnung der Wandstärke gilt die Regel, dass am Formen nur der freie Teil des Halbzeugs teilnimmt, d.h. der Teil, der die Werkzeugoberfläche nicht berührt. Da es, sobald das Halbzeug die Form berührt, sofort erkaltet und für weitere Formungen nicht mehr geeignet ist.

In der Tab. 8.2 sind die meist verwendeten Methoden des Formens aufgeführt, einschließlich ihrer Vorteile und Prozesseinschränkungen. Die Bemühung um möglichst gleichmäßige Produktwände und große Produkttiefen führt zur Entwicklung einer Reihe kombinierter Methoden des Formens.

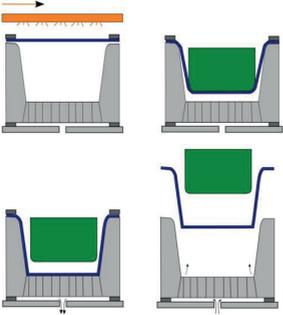
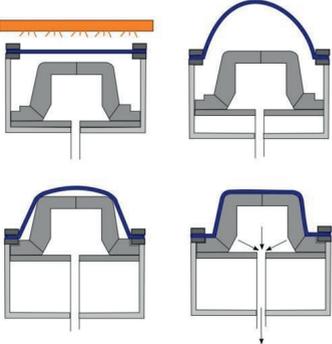
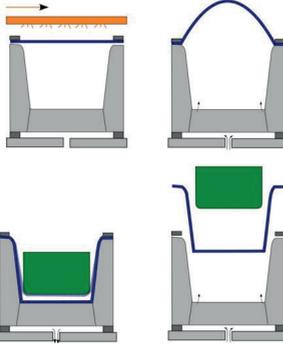
Tab. 8.2a Übersicht der Grundarten des Thermoformens

<p>Mechanisches Formen positiv</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Formdruck • Geeignet für große Plattendicken • Gute Qualität der Teiloberfläche • Langsame Formungsgeschwindigkeit
<p>Überdruckformen positiv</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ hohe Formungsdrücke • Geeignet für dickwandige Platten • Gute Qualität der Teiloberfläche • Für flache Teile mit dem Verhältnis Tiefe/Durchschnitt < 0,4

Tab. 8.2b Übersicht der Grundarten des Thermoformens

<p>Überdruckformen negativ</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ hohe Formungsdrücke • Gute Qualität der Teiloberfläche • Tiefere Teile erreichbar • Für Teile mit dem Verhältnis Tiefe/Durchschnitt < 1
<p>Vakuumformen negativ</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Formungsgeschwindigkeit • Für Formen von flachen Teilen • Für Teile mit dem Verhältnis Tiefe/Durchschnitt $< 0,4$ • Dicke der seitlichen Wände vom Teil entspricht fast der ursprünglichen Dicke des Halbzeugs • Verdünnung der Wand im Bodenbereich • Äußere Oberfläche von guter Qualität
<p>Vakuumformen positiv</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Formungsgeschwindigkeit • Gleichmäßigere Wanddicke als beim Unterdruckformen im Negativ • Geeignet für Teile mit dem Verhältnis von Tiefe/Durchschnitt = 1 • Das Werkzeug muss Entformungsschrägen für einfaches Entformen haben • Geeignet für mittelgroße Teile und gegliederte Teile • Innere Oberfläche von guter Qualität

Tab. 8.2c Übersicht der Grundarten des Thermoformens

<p>Vakuumformen im Negativ mit mechanischer Vorformung</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Hilfsmatrize besteht aus wenig leitfähigen Werkstoffen • Das Vorformen wird für etwa 70 % der Produktentiefe gewählt • Die Stärke der seitlichen Wand ist gleichmäßig • Geeignet für Teile mit dem Verhältnis von Tiefe/Durchschnitt < 1,5
<p>Vakuumformen im Positiv mit der pneumatischen Vorformung</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • In der ersten Phase kommt es zur Vorformung mit Druckluft, erst dann wird das Werkzeug gehoben und Vakuum erstellt, das das Produkt fertigformt. • Höherer Beschaffungspreis der Anlage • Deutliche Vergleichmäßigung der Produktwanddicke • Geeignet für Teile mit dem Verhältnis von Tiefe/Durchschnitt > 1,5
<p>Vakuumformen im Negativ mit pneumatischer und mechanischer Vorformung</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • In der ersten Phase kommt es zur Vorformung mit Druckluft (0,5 s bis 1 s), es folgt die mechanische Vorformung (ca. 1 s) und Herstellung vom Vakuum, das das Teil fertigformt (ca. 1 s) • Es wird getrennt bei tiefen oder flachen Teilen mit Doppelwänden angewendet • Geeignet für Teile mit dem Verhältnis von Tiefe/Durchschnitt > 2

Eine weitere sehr wichtige Phase des Formens ist die Teilabkühlung und das Abschneiden. Wie bei den meisten Techniken der Polymerverarbeitung ist die Wärmeableitung von den Produkten mit einem zirkulierenden wärmetragenden Fluid (meistens Wasser) in gegenseitig verbundenen Kanälen (siehe Abb. 8.3) sichergestellt. Die Kanäle werden meistens nicht direkt in die Formen gebohrt, sondern befinden sich in den Aufspannplatten, an die die einzelnen Formen fixiert sind. Die Ableitung der Wärme vom Material wird über das Durchdringen in die Form, die Aufspannplatten und das wärmetragende Fluid realisiert. Diese Methode der Wärmeableitung ermöglicht einen schnellen Formenwechsel und dank der hohen Wärmeleitfähigkeit des Formmaterials (meistens aus Aluminium-Legierungen hergestellt) auch eine hohe Produktivität. Neben dem Formmaterial und der Konstruktion der Kühlungskanäle ist auch die Temperatur des zirkulierenden Fluids ein wesentlicher Parameter der Kühlungsphase. Um eine maximale Effektivität bei der Kühlung und der Produktivität zu erreichen, wird die Temperatur des wärmetragenden Fluids möglichst niedrig gehalten. Es sollten jedoch keine Temperaturen unter 5°C verwendet werden, da dann eine Taufeuchtigkeit auf der Form entstehen kann, welche Oberflächenfehler verursacht (Feuchtigkeitsschlieren). Weiterhin kann das Wiederaufwärmen einen Anstieg der inneren Spannung des Produktes hervorrufen. Die Bedeutung der Abkühlungsproblematik wächst mit der Wanddicke des Halbzeuges und dem Serienmaß der Produktion. Zum Beispiel wird für die Prototypenproduktion, beim Holz- oder Kunststoffformen, oder beim Formen aus synthetischen Schäumen nur die äußere Kühlung mit der Druckluft eingeleitet.

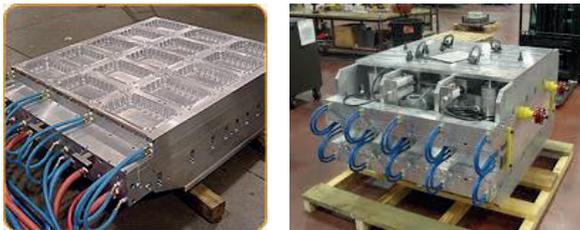


Abb. 8.3 Beispiel von Aluminiumformen mit verbundenen Kühlungs-, bzw. Temperierungskanälen

Mit dem Stanzen versteht man eine mechanische Abtrennung des überschüssigen Materials von dem geformten Halbzeug (Platten oder Folien). Der Abschnitt wird je nach der Wanddicke vom Teil, Materialtyp, Formkonzeption und Anzahl der Teile, geforderten Rauigkeit der Stanzoberfläche, Toleranz der Produktabmessungen und Stanzgeschwindigkeit gewählt. Meistens wird das Stanzen mit Hilfe von scharfen Kanten des Werkzeugs, der Form (Druckschnitt), der Messerwerkzeuge (Scherschnitt), mit rotierenden Zahnelementen (zarter Zugschnitt), mit heißen Drahten oder Laser (Temperaturabschnitt) oder mit Schleifen, Abreiben (Abrasierter Abschnitt), siehe Abb. 8.4, durchgeführt. Beim Stanzen entsteht eine große Menge an Pulver, das infolge der entstehenden elektrostatischen Ladung vom Kunststoff (vor allem bei PS und PMMA) von den Trennflächen angezogen wird. Dieser negative Effekt kann mit einem kontinuierlichen Absaugen der Pulverteilchen eliminiert werden.



Abb. 8.4 Beispiele der Abschneidung vom Formteil

Die Maschinen für das Formen der thermoplastischen Platten und Folien kann man, neben der Formdruckmethode (mechanisch oder pneumatisch), auch je nach dem Niveau der Automatisierung auf halbautomatische und vollautomatische Thermoformmaschinen untergliedern, siehe Abb. 8.5 und Abb. 8.6. Bei den Halbautomaten wird das Halbzeug in der Plattenform in die Maschine manuell eingelegt und mechanisch oder pneumatisch befestigt. Diese Maschinen sind für die Prototypen- und Kleinserienproduktion geeignet und verlangen einen ausreichenden Abschnitt vom überschüssigen Material. Vollautomatische Maschinen (kontinuierliche Produktionslinien) werden insbesondere für Großserienproduktionen in der Verpackungsindustrie angewendet. Sie arbeiten ganz automatisch einschließlich der

Abwicklung der Halbzeuge (Folien) aus den Rollen und dem Entfernen des überschüssigen Materials beim Stanzen.



Abb. 8.5 Halbautomat mit manueller Einlegung der Platten



Abb. 8.6 Vollautomat (kontinuierliche Produktionslinie)



An den Vollautomaten werden meistens Folien aus PP, PS, PET und PLA mit Dicken zwischen 0,3 mm und 2 mm verarbeitet. Der Fertigungszyklus dieser Anlagen bewegt sich zwischen 5 s und 15 s.

FÜGEN VON KUNSTSTOFFTEILEN

9

Das **Fügeverfahren von Kunststoffteilen** aus dem gleichen oder auch verschiedenen Kunststoffen, mit Metallen und weiteren Werkstoffen kommt dann zur Anwendung, wenn der finale Zusammenbau zu groß oder komplex ist und nicht in einem Stück hergestellt werden kann, oder wenn Demontage erforderlich wird. Die Thermoplaste werden oft **verschweißt** - die Fügeflächen werden aufgeschmolzen, was eine gegenseitige Diffusion der Polymerketten ermöglicht. *Duroplaste und Elastomere kann man nicht schweißen*, zu ihrer Verbindung werden das **Kleben** oder *mechanische Verbindungsmethoden* genutzt. Erfolgreich verkleben kann man nur einige Typen der Thermoplaste. Beim Kleben werden zwei Füge Teile durch Auftragen einer Klebstoffschicht auf die Fügeflächen verbunden. Schweißen und Kleben gehören zu den sog. untrennbaren Verbindungen. Mechanische Verbindungen wie Schraub- oder Rastverbindungen werden als sog. trennbare Verbindungen bezeichnet und gehören eher in den Bereich der Konstruktion von Kunststoffteilen.

9.1

Kunststoffschweißen

Das Kunststoffschweißen ist eine der Fügeverfahren von Thermoplasten, die Anforderungen an die Schweißbarkeit stellen. Thermoplaste werden unter Einwirkung von Wärme weicher, gehen von dem festen in den sog. viskoelastischen Zustand und nachfolgend in die Schmelze über. Beim Schweißen werden die erwärmten Flächen gegeneinandergedrückt, sodass es zur Vermischung von Makromolekülen in der Fügezone kommt. Eine untrennbare Verbindung entsteht dank der Wiederherstellung des Ausgangszustands durch langsame Abkühlung des Materials ohne Beschleunigung. Bei den Thermoplasten kommt es im verschweißten Bereich zu keiner Strukturänderung, wie bei Metallen. Es handelt sich nur um einen physikalischen Prozess. Beim Schweißen werden die makromolekularen Ketten miteinander vermischt und die Anziehungskräfte wiederhergestellt.

Die chemische Substanz, das physikalische Verhalten der zu schweißenden Kunststoffe, der Typ der angewendeten Schweißtechnik und die Schweißbedingungen werden durch die Grundparameter des Schweißprozesses beeinflusst:

Temperatur, Druck und Zeit. Zum Beispiel beim Polyfusion-Schweißen von PP wird die Temperatur der Heißkörper zwischen 250 °C und 270 °C, beim Stumpfschweißen zwischen 200 °C und 220 °C, und beim Warmgasschweißen mit einem Schweißdraht zwischen 300 °C und 340 °C geregelt. Der Schweißdruck muss immer an den verbindenden Flächen der Fügeile wirken und wird in Abhängigkeit von der Technologie hergeleitet. Bei Handverfahren wird der Druck durch die Schweißer mit deren Händen erzeugt, bei maschinellen Verfahren wird es mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch hergeleitet. Die Schweißzeit wird vor allem durch die gewählte Schweißtechnologie bestimmt. Beim Polyfusion-Schweißen und Stumpfschweißen ist die Zeit nach einzelnen Prozessphasen definiert. Beim Handschweißen wird die Zeit durch die Geschwindigkeit des Schweißers bestimmt.

Die Qualität der Schweißverbindung wird neben den Schweißparametern auch von den Materialeigenschaften, der Schweißtechnik und der Umgebung beeinflusst. Zu den Einwirkungen, die durch Materialeigenschaften gegeben sind, gehört insbesondere die Längenausdehnung der Kunststoffe. Beim Abkühlen der Schweißverbindung schwindet das Material und es entstehen verbleibende Innenspannungen. Zu weiteren Faktoren gehört die geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe, die durch die unzureichende Plastifizierung der Fügeflächen verursacht wird. Daher werden oft höhere Schweißtemperaturen eingesetzt, die Wärmebeschädigung der Fügeflächen verursachen, ohne das Material in Tiefe zu plastifizieren.

Ein Einfluss aus der Umgebung ist insbesondere beim Schweißen in Außenräumen zu beobachten. Der Schweißer darf nicht nur die Temperatur, die Feuchtigkeit und die Luftbewegung, sondern auch die Niederschläge, den Einfluss der Sonnenstrahlung usw. berücksichtigen. Bei ungünstigen Bedingungen muss man zu ergänzenden Maßnahmen (siehe Tab. 9.1), bzw. Verschiebung der Schweißstätigkeit schreiten.

Einen wesentlichen Bestandteil des Schweißverfahrens bildet die gegenseitige Abstimmung der Schweißparameter, sodass Schweißnähte mit ausreichender Festigkeit und möglichst ohne Innenspannung entstehen. Die Anforderung auf minimale Innenspannung kann mit einer gleichmäßigen und ausreichenden Erwärmung der Fügeflächen mit nachfolgender langsamer und gleichmäßiger Abkühlung sichergestellt werden.

Tab. 9.1 Einflüsse der Umgebung auf den Schweißprozess

Umgebungsbedingungen	Einfluss auf den Schweißprozess	Maßnahme
Niederschläge	Fehlerhafte Schweißverbindungen, Schweißen nicht möglich.	Zelt aufschlagen, Wasserdurchdringung verhindern.
Hohe Luftfeuchtigkeit	Kondensatbildung (v.a. bei niedrigen Temperaturen).	Schweißflächen vor dem Schweißen trocknen und erwärmen.
Niedrige Temperaturen (< 5 °C)	Kondensatbildung, veränderte Schweißbedingungen.	Schweißflächen auf die Temperatur (10 + 15) °C erwärmen, Schutzzelt aufheizen.
Hohe Temperaturen	Unzulässige Veränderungen der Abmessungen als Folge der Wärmeausdehnung vom Material (Übersetzen, Probleme mit Anpassung usw.).	Anpassung der Bedingungen.
Direkte Sonnenstrahlung	Ungleichmäßige Wärmeausdehnung vom Material, Änderung von Abmessungen und Form des Teils.	Schutz des Teils durch Verbergen vor dem Sonnenlicht.
Wind, Luftzug	Unregelmäßige Längenausdehnung, ungleichmäßige Schweißtemperatur, unzureichende und unregelmäßige Plastifizierung der Schweißzone, Verschmutzung der Schweißfläche (Staub).	Verwendung der Schutzwände oder Zelt.

9.1.1 Schweißeignung der Werkstoffe

Miteinander schweißbar sind in der Regel nur Thermoplaste gleicher Art und gleichen Typs, also Kunststoffe gleicher chemisch-physikalischen Basis. In der Praxis gibt es jedoch Ausnahmen, mit denen aber nur selten gearbeitet wird (z.B. Schweißen von PVC-U mit PMMA). Kunststoffe, wie zum Beispiel Polyethylene, die dank unterschiedlicher Anordnung der makromolekularen Ketten viele Strukturformen besitzen, jedoch die gleiche chemische Zusammensetzung haben, sind nur begrenzt schweißbar. Der entscheidende Faktor für die Schweißbarkeit der Kunststoffe sind ihre Fließeigenschaften nach dem Aufschmelzen (Schmelzflussindex – MFI). Es wird sich um möglichst niedrige Materialviskosität bemüht, die bei hohen Temperaturen erreicht wird. Dabei ist eine thermische Beschädigung vom Material (seine Degradation) zu verhindern. Allgemein gilt, dass Polymere mit hoher molaren Masse (>10⁶ g/mol), wie z.B. PTFE oder PE-UHMW, nicht schweißbar sind. Es gilt jedoch

nicht hundertprozentig, da z.B. Polybutylen (PB) mit einer molaren Masse von mehreren Millionen g/mol werden üblicherweise geschweißt.

Die *Schweißbarkeit von Werkstoffen* können wir in folgende Gruppen aufteilen:

- *garantierte Schweißbarkeit*, bei zwei Werkstoffen gleicher Art und Typ mit gleichen oder ähnlichen Schmelzflussindexwerten MFI (z.B. PE-HD mit PE-HD),
- *bedingte Schweißbarkeit*, bei gleicher Materialart, jedoch unterschiedliche Materialtypen (z.B. PP-H mit PP-R, PE-HD mit PE-LD usw.).

Allgemein gilt, dass das Kombinieren von verschiedenen Kunststoffarten beim Schweißen (z.B. PE mit PP, PC mit PMMA usw.) nicht zu empfehlen ist. In der technischen Praxis gibt es eine große Menge von Schweißmethoden der Thermoplaste. In den folgenden Kapiteln sind die wichtigsten von ihnen beschrieben.

9.1.2 Heizelementschweißen

Die Methode der Erwärmung und des Anschmelzens der Oberfläche der Fügeiteile nutzt eine erwärmte Metallplatte (sog. Spiegel). Sobald an den Oberflächen eine ausreichende Schmelzschicht entsteht, wird das Heizelement entfernt und die Fügeiteile unter Druck zusammengepresst, sodass sich nach Abkühlung eine Schweißnaht bildet. Die Fügeiteile werden, sowohl während der Erwärmung, als auch beim Verbinden und Abkühlen, axial belastet.

Das Verfahren des **Heizelementschweißens** (siehe Abb. 9.1) verläuft wie folgt: Die Fügeiteile werden, unter gleichzeitiger Druckausübung, in Kontakt mit dem Heizelement gebracht (*Phase 1*). Die Wärmeleitung (Konduktion) stellt die Übertragung der Wärme vom Heizelement auf die Teile sicher, was im Verlauf der Zeit zur lokalen Erhöhung der Materialtemperatur führt. Sobald die Schmelztemperatur erreicht wird, beginnt das Material zu schmelzen. Die Materialschmelzung entfernt Oberflächenunregelmäßigkeiten des Werkstücks und bildet einen glatten Rand auf der Grenzfläche der Verbindung. Infolge der Druckeinwirkung wird ein Teil des geschmolzenen Materials auf die Oberfläche der Verbindung ausgepresst (es entsteht der sog. Schweißgrat). In der *Phase 2* sinkt der Druck, die Wärme durchdringt tiefer in das Material und die angeschmolzene Schicht erweitert sich. Die Geschwindigkeit, bei der sich die angeschmolzene Materialschicht vergrößert, ist von der Wärmeleitfähigkeit der geschmolzenen Schicht abhängig.

Nach dem Erreichen der benötigten Schmelzschicht wird das Füge­teil von dem Heizelement getrennt (*Phase 3*), der Druck und die Oberflächentemperatur sinken. Diese Phase sollte möglichst schnell ablaufen ($< 3 \text{ s}$), damit eine vorzeitige Abkühlung des geschmolzenen Materials verhindert wird. Bei längerer Zeit kann sich an der Kontaktfläche der Verbindung eine dünne erstarrte Oberflächenschicht bilden, die die Qualität der Schweißverbindung beeinflusst. Nachfolgend werden die Füge­teile unter Druck verbunden (*Phase 4*), was zur Folge hat, dass das geschmolzene Material im Verlauf der Abkühlung und Erstarrung lateral in die Richtung von der Schweißverbindung fließt. Die Festigkeit der finalen Schweißverbindung ist durch die intermolekulare Diffusion gegeben, die eine Vernetzung der makromolekularen Ketten zur Folge hat. Die Abkühlung beeinflusst die Bildung der finalen übermolekularen Materialstruktur und die Intensität der Restspannung in dem Schweißbereich. Daher ist es notwendig bei der Abkühlung einen konstanten Druck zu behalten, damit man Deformationen der Schweißverbindungen verhindert.

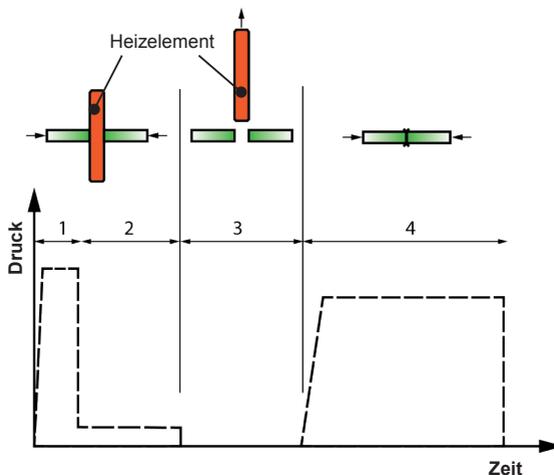


Abb. 9.1 Heizelementschweißen

Das Heizelementschweißen ist eine einfache und wirtschaftliche Methode, bei der man hochfeste und hermetisch geschlossene Schweißnähte, sowohl bei großen, als auch kleinen Füge­teilen, erreichen kann. Man kann Verbindungen mit einer flachen, gekrümmten oder komplexen Geometrie schweißen und gleichzeitig dabei Unregel-

mäßigkeiten der Oberfläche während der Erwärmungsphase ausgleichen. Unterschiedliche Werkstoffe, die kompatibel sind, jedoch unterschiedliche Schmelztemperaturen haben, kann man mit Heizelementen unterschiedlicher Temperaturen schweißen. Den Schweißprozess kann man leicht automatisieren und im Hinblick darauf, dass kein ergänzendes Material verwendet wird, sind schlecht verschweißte Teile einfach wiederverwertbar. Der Hauptnachteil von diesem Prozess ist eine lange Zykluszeit im Vergleich mit anderen üblichen Methoden, wie z.B. Vibrations- oder Ultraschallschweißen. Die Schweißzeit bewegt sich zwischen 10 s und 20 s für kleine Fügeteile und bis zu 30 Minuten für große Rohre. Ein zweiter Nachteil sind große Temperaturen, die zum Anschmelzen der zu verbindenden Werkstoffe notwendig sind. Die Wärme wird nicht wie beim Vibrationsschweißen lokalisiert und in manchen Fällen kann es zu Degradation vom Kunststoff kommen oder eine Verklebung des Heizelements verursachen.

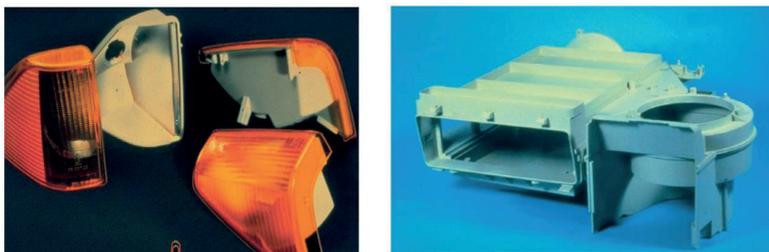


Abb. 9.2 Mit Heizelementschweißen geschweißte Kunststoffteile

Die Methode wird häufig in der Automobilindustrie genutzt, wo das Schweißen von Rück- und Blinkleuchten zu gewöhnlichen Anwendungen gehört (siehe Abb. 9.2). Die Innenabdeckung wird in der Regel aus ABS hergestellt und ist an das äußere Teil geschweißt, das aus PMMA oder PC hergestellt ist. Es handelt sich um eine der wenigen Materialkombinationen, die kompatibel für Heizelementschweißen sind. Dank identischen Schmelztemperaturen (Viskositätsströmung) der Polymere können die Leuchten aus ABS und PMMA mit einem Heizelement geschweißt werden. Für ABS und PC sind Doppelheizelemente notwendig. Auftragskonstruktionen der Schweißmaschinen werden bei der Herstellung von Blaskraftstoffbehältern aus PE-HD verwendet. Diese bestehen aus bis zu 34 Fügeteilen, die an den Behälter geschweißt werden sollen: es handelt sich um Clips, Filtermündungen, Entlüftungs-

leitungen, Konsolen usw. Weitere mit Heizelementschweißen hergestellte Automobilteile sind Batteriegehäuse, Vergaserschwimmer, Kühlflüssigkeit- und Scheibenwaschwasserbehälter und Luftkanäle. Im Bereich der Haushaltsgeräte handelt es sich zum Beispiel um Sprüharme in den Geschirrspülern oder Spülkästen der Waschmaschinen (siehe Abb. 9.2).

Eine Übersicht der einzelnen Heizelement-Schweißverfahren ist in der Tab. 9.2. angeführt. Die gängigste Anwendung ist die Verbindung von Kunststoffrohren. Als Beispiel nennen wir die zwei häufigsten Methoden, und zwar das *Stumpfschweißen* und das *Polyfusion-Schweißen*.

Tab. 9.2 Übersicht der Heizelement-Schweißverfahren

Heizelement-Schweißverfahren		Geschweißte Halbzuge	Verfahren	
			Manuell	Maschinell
Direkt	Stumpfschweißen	Rohre, Platten, Profile	ausnahmsweise	ja
	Profilschweißen	Platten, Profile	ausnahmsweise	ja
	Abkanten	Platten	ausnahmsweise	ja
	Polyfusion-Schweißen	Rohre	bis \varnothing 40 mm	bis \varnothing 125 mm
	Elektromufeenschweißen	Rohre	nein	ja
	Heizkeilschweißen	Folien, Profile	ausnahmsweise	ja
	Schweißen mit Nahtabtrennung	Folien, Dünnpplatten	ausnahmsweise	ja
Indirekt	Schweißen ohne Schweißgratbildung	Rohre	nein	ja
	Impulsschweißen	Folien	ja	ja
	Kontakt-Heizelementschweißen	Folien	nein	ja
	Rotationsreibschweißen	Folien	nein	ja

9.1.2.1 Stumpfschweißen

Das *Stumpfschweißen* ist eine Methode, bei der gereinigte und entfettete Stirnseiten der Rohre (auch Platten- und Profildflächen) mit einem Heizelement

(Spiegel), das meistens elektrisch aufgeheizt wird, erwärmt und unter Druck verbunden werden. Zu den am häufigsten geschweißten Werkstoffen gehören PP, PE und PVDF. Das Werkzeug in Form eines Heizelements ist mit einer antiadhäsiven Schicht ausgerüstet, meistens aus PTFE, die im Brennofen ausgehärtet wird. Die antiadhäsive Schicht verhindert die Haftung des zu verbindenden Materials auf der Oberfläche des Heizelements. Die Kontaktflächen des Werkzeugs müssen planparallel sein, damit die beiden Fügeflächen beim Schweißen präzise anliegen. Beispiele von typischen Maschinen für das Stumpfschweißen sind in Abb. 9.3 bis Abb. 9.5 gezeigt. Charakteristisch für das Stumpfschweißen ist die Schweißgratbildung. Schweißgräte entstehen an der Verbindungslinie der gefügten Werkstücke als Folge des Verbindungsdruckes (siehe Abb. 9.6).

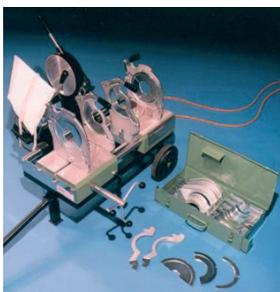


Abb. 9.3 Anlage für manuelles Stumpfschweißen



Abb. 9.4 Halbautomatische Anlage für das Stumpfschweißen



Abb. 9.5 Maschine für Stumpfschweißen von Rohren mit großen Durchschnitten



Abb. 9.6 Schweißgrat an einer Schweißverbindung

9.1.2.2 Polyfusion-Schweißen

Das **Polyfusion-Schweißen** wird ausschließlich für Rohre aus PP, PE und PVDF mit einem maximalen Durchmesser von 125 mm verwendet. Die Methode kennzeichnet sich durch eine parallel laufende Erwärmung der äußeren Rohroberfläche und der inneren Oberfläche der Fitting-Mündung mittels Polyfusion-Aufsatz (Heizformteil). Nach der Erwärmungszeit werden die Rohre und die Formteile von dem Aufsatz getrennt und die Stirnseite des Rohrs wird in die konische Mündung des Formteils eingesteckt. Ein Prozessschema ist in der Abb. 9.7 und eine fertige Schweißnaht des Formteils und des Rohrs in der Abb. 9.8 und Abb. 9.9 gezeigt.

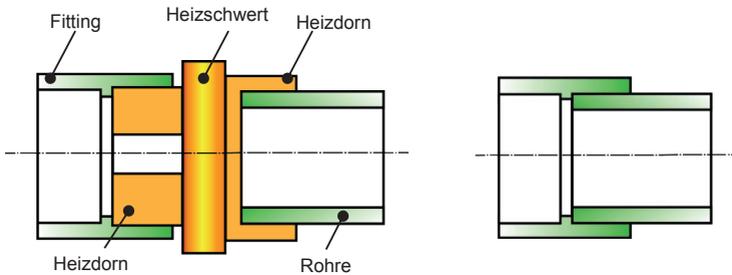


Abb. 9.7 Polyfusion-Schweißen



Abb. 9.8 Manuelles Stumpfschweißen



Abb. 9.9 Schweißnaht (Polyfusion-Schweißen)

9.1.3 Ultraschallschweißen

Diese Methode nutzt die Ultraschallenergie hoher Frequenzen zwischen 20 kHz und 40 kHz zur Herstellung von mechanischen Schwingungen mit niedriger

Amplitude (1 μm bis 25 μm). Die Schwingungen verbreiten sich zu der Kontaktzone beider Fügeflächen, wo die Schwingungen in Wärme umgewandelt und die Polymere lokal angeschmolzen werden. Nach der Abkühlung entsteht die Schweißnaht. Die Fügeile werden zwischen der Schweißbacke (*Sonotrode*) und der Stützplatte positioniert. Das **Ultraschallschweißen** ist die schnellste Schweißtechnik. Der Prozess dauert standardweise 0,1 s bis 1 s. Wenn die Ultraschallschwingungen auf den Thermoplast einwirken, entstehen in dem Material Wellen, die die Form von Sinuskurven haben. Ein Teil dieser Energie wird durch die intermolekulare Reibung umgewandelt, was zur Ansammlung von Wärme in dem Material führt. Der andere Teil wird an die Grenzfläche der Verbindung übertragen, wo es zu einer lokalen Erwärmung kommt. Die optimale Übertragung der Ultraschallenergie in die Naht und das daraus folgende Materialschmelzen ist von der Teilgeometrie und der Fähigkeit des Materials Ultraschallschwingungen zu absorbieren abhängig. Die Wärme ist meistens, infolge der Oberflächenunregelmäßigkeiten, auf der Oberfläche der Naht am größten, da sie einer größeren Belastung und Reibungskraft ausgesetzt wird als der Rest des Materials. Bei vielen Anwendungen wird beim Ultraschallschweißen in dem oberen Bereich des Fügeile ein Dreiecksvorsprung ausgepresst, der als Energierichtungsgeber dient (siehe Abb. 9.10). Dieser wird zur Konzentrierung der Ultraschallenergie auf die Grenzflächen der Schweißnaht genutzt (siehe Abb. 9.11).

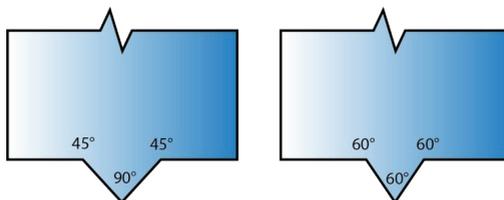


Abb. 9.10 Energierichtungsgeber beim Ultraschallschweißen von amorphen (links) und teilkristallinen Werkstoffen (rechts)

Sobald der Energierichtungsgeber in Kontakt mit der Fügefläche gebracht wird, entwickelt sich intensive Wärme. Der Energierichtungsgeber wird geschmolzen und die zukünftige Fläche der Schweißnaht wird gefüllt (siehe *Phase 1* in der Abb. 9.11). Die Fügeflächen stoßen aufeinander und die Schmelzgeschwindigkeit erhöht sich (*Phase 2*), nachfolgend verläuft das Schmelzen in einem stabilisierten Zustand

(Phase 3) und es entsteht dabei eine konstante Dicke der Schmelze in der Naht und man erzielt eine konstante Wärmedistribution. Nach einer bestimmten Zeit oder nach Erreichen einer konkreten Energie, Leistung oder Dicke der Schmelze schaltet sich die Speisung ab und die Ultraschallschwingungen wirken nicht mehr weiter (Anfang der Phasen 4). Der Druck wird weiterhin auf einem fast konstanten Niveau gehalten, was das ergänzende Auspressen der Schmelze von der Schweißnaht verursacht. Es wird eine Molekularverbindung hergestellt und die Schweißnaht erkaltet danach.

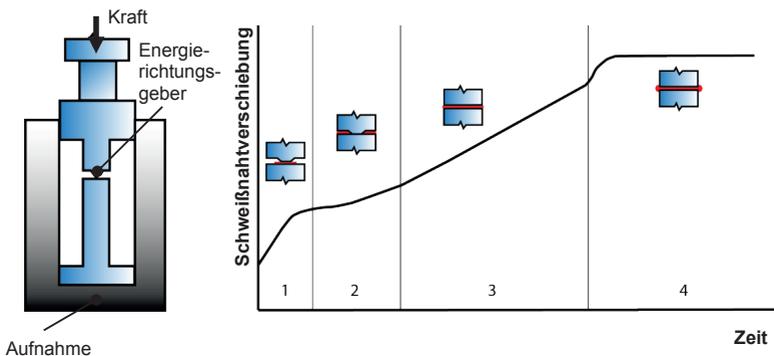


Abb. 9.11 Ultraschallschweißen

1 – Beginn des Schmelzens; 2 – Höchste Heizleistung;
3 – Schmelzen im gesamten Querschnitt; 4 - Kühlung unter Druck

Das Ultraschallschweißen ist eine der gängigsten Schweißmethoden, die in der Kunststoffindustrie verwendet wird. Die Methode ist schnell, wirtschaftlich, einfach mechanisiert und für eine Massenproduktion mit der Produktionsgeschwindigkeit von bis zu 60 Teilen pro Minute geeignet. Es bildet konsistente und hochfeste Verbindungen. Einschränkungen dieses Verfahrens bestehen darin, dass mit gegenwärtigen Technologien große Verbindungen nicht in einem Arbeitsschritt geschweißt werden können (man kann Platten mit den Abmessungen von max. 250 mm x 300 mm schweißen). Weiterhin werden für alle Schweißteile verschiedene geometrische Anpassungen der Kontaktflächen benötigt.

Zu den Anwendungen des Ultraschallschweißens gehören in der Automobilindustrie z.B.: Bauteile der Leuchten, Instrumententafel, Tasten und Schalter, Kraftstofffilter, Behälter für Flüssigkeiten, Sicherheitsgurtschlösser; elektronische Schlüsselgehäusen; Lampen, in der Elektronik und bei Haushaltgeräten: Schalter,

Leser, USB-Flash-Laufwerke; in der Medizintechnik: Filter, Katheter, medizinische Bekleidung, Masken und in der Verpackungsindustrie z.B. Blister Verpackungen, Plastik-Beutel, Tuben, Lagercontainer usw.

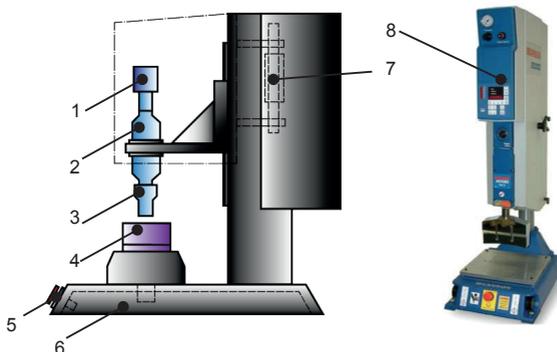


Abb. 9.12 Ultraschallschweißanlage

1 – Umwandler; 2 – Verstärker; 3 – Sonotrode; 4 – geschweißte Kunststoffteile;
5 – Stoptaste; 6 – Bodenplatte; 7 – pneumatische Kraftaufbringung;
8 – Mikroprozessor der Steuerung

9.1.4 Vibrationsschweißen (Reibschweißverfahren)

Das **Vibrationsschweißen** nutzt die durch die Reibung von Werkstoffen erzeugte Wärme, was das Anschmelzen der Kontaktflächen der Fügeteile zur Folge hat. Die angeschmolzenen Werkstoffe fließen unter Druck zusammen und erstellen nach der Abkühlung eine Schweißnaht. Durch das Vibrationsschweißen wird eine Schweißnaht in der Zeit zwischen 1 s und 10 s hergestellt und die Technik ist für verschiedene thermoplastische Bauteile mit flachen oder leicht gekrümmten Oberflächen geeignet. Wir unterscheiden das **lineare** (Reibung wird durch eine lineare, reversible Bewegung erzeugt), siehe Abb. 9.13, und das **orbitale** (das obere Fügeteil rotiert in einer Kreisschwingbewegung) **Vibrationsschweißen**. Das lineare Vibrationsschweißen ist die am häufigsten gewählte Methode. Das orbitale Vibrationsschweißen jedoch ermöglicht es, unregelmäßig geformte Teile zu schweißen. Parameter, die die Festigkeit der finalen Schweißnaht beeinflussen, sind die Amplitude, die Schwingungsfrequenz, der Schweißdruck und die Schweißzeit.

Der Schweißprozess besteht aus vier Phasen (siehe Abb.9.14). Die durch Reiben erzeugte Wärme erhöht die Glasübergangstemperatur (bei amorphen Thermoplasten) oder die Schmelztemperatur (bei teilkristallinen Thermoplasten). In der *Phase 1* befindet sich das Material immer noch im festen Zustand. In dieser Phase entsteht noch keine Verbindung. In der *Phase 2* beginnt das Schmelzen der Werkstoffe an den Kontaktflächen der Fügeteile und es kommt zum lateralen Fluss in seitlicher Richtung, wodurch die Schweißnahtverschiebung größer wird. In der *Phase 3* ist die Geschwindigkeit der Herstellung von der Schmelze gleich der Geschwindigkeit der Verdrängung der Schmelze, die sich deshalb in der Zeit linear vergrößert (siehe Abb. 9.14). Am Ende dieser Phase wird die Schwingungsbewegung gestoppt und die Durchmischung beider Fügeteile in der Schweißnaht erhöht sich im Verlauf der Erstarrung unter Druck (*Phase 4*).

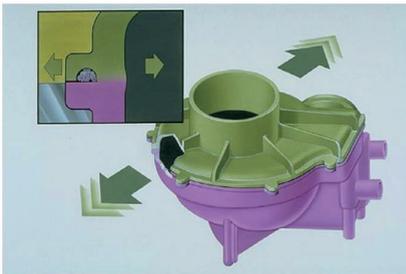


Abb. 9.13 Lineares Vibrationsschweißen

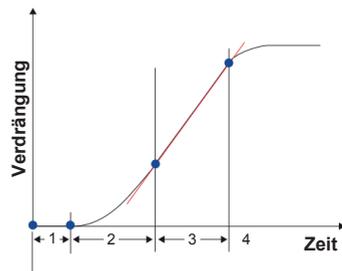


Abb. 9.14 Vibrationsschweißen

Vorteile des Vibrationsschweißens sind relativ kurze Produktionszeiten, energetische Effektivität, die Möglichkeit große Bauteile zu schweißen und minimale Anforderungen an die Oberflächenbehandlung. Im Gegensatz zu dem Heizelementschweißen ist die Erwärmung lokal ausgerichtet und es gibt hier eine viel kleinere Wahrscheinlichkeit, dass es zur Materialdegradation infolge der zu großen Erwärmung an den Fügeflächen kommt. Das Vibrationsschweißen sollte jedoch nur bei solchen Bauteilen verwendet werden, bei denen keine zu hohen Anforderungen an die Maßtoleranzen gestellt werden.

Das Vibrationsschweißen wird üblicherweise für die Verbindung von großen Bauteilen verwendet. Kleinere Bauteile kann man Mit Hilfe von Formen mit mehreren Hohlräumen wirtschaftlicher schweißen. Typische Abmessungen der Teile bewegen

sich von 76 mm x 76 mm bis zu 610 mm x 1520 mm. Die Methode wird für dickwandige, druckdichte Verbindungen verwendet. Im Bereich der Haushaltgeräte z.B. zur Verbindung der Pumpenbauteile von Waschmaschinen und Geschirrspülern, Waschmitteldosierer und Sprüharmer der Geschirrspüler. In der Automobilindustrie wird die Methode für das Zusammenbauen der Leuchten, Rückleuchten und Instrumententafeln (siehe Abb. 9.15), für die in zwei Ebenen geschweißten Türverkleidungen, Cockpit- und Zierelemente, Klima- und Heizleitungen, Vakuumbehälter, Kraftstofffilterkappen und Luftströmungssensoren verwendet.



Abb. 9.15 Anwendungen der mit Vibrationsschweißen hergestellten Teile

9.1.5 Rotationsschweißen

Das **Rotationsschweißen** ist eine weitere Methode des Reibschweißverfahrens. Es handelt sich um ein Verfahren, bei dem die thermoplastischen Teile mit rotationssymmetrischen Fügeflächen unter Druck bei gleichzeitiger kreisförmiger Drehung aneinander reiben. Gewöhnlich steht das untere Füge teil still, während das obere rotiert. Wärme, die im Verlauf von diesem Prozess geschaffen wird, schmilzt den Kunststoff auf der Kontaktfläche der Füge teile und nach der Abkühlung entsteht eine Schweißnaht.

Das Rotationsreibschweißen kann in vier Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase werden die Füge teile manuell in die Schweißanlage gelegt. Beide Füge teile befinden sich auf einer Vorrichtung, die an der Grundplatte der Schweißanlage angebaut ist (siehe Abb. 9.16a). In der zweiten Phase beginnt der Triebkopf zu rotieren, und sinkt auf das obere Füge teil (siehe Abb. 9.16b). Die Drehgeschwindigkeit ist in der Regel zwischen 200 und 14 000 Umdrehungen pro Minute,

in Abhängigkeit von der Größe der Fügeteile. Danach folgt das Schweißen. Dabei setzt der Triebkopf auf das obere Fügeteil auf, dreht sich und die relative Bewegung zwischen den Fügeflächen erzeugt Wärme und lässt das Material auf den Kontaktflächen schmelzen. Das Schweißverfahren selbst entspricht der Beschreibung des Vibrationsschweißens (siehe Abb. 9.16c). Nach ausreichender Erstarrung der Schweißnaht erhebt sich der Triebkopf und die Teile werden manuell aus der Anlage entnommen (siehe Abb. 9.16.d). Beispiele der geschweißten Teile und der Schweißanlage sind in den Abb. 9.17 und Abb. 9.18 gezeigt.

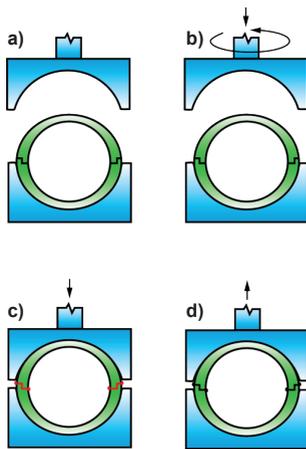


Abb. 9.16 Rotationsschweißen



Abb. 9.17 Beispiel der mit Rotationsschweißen verschweißten Teile

Das Rotationsschweißen ist ein einfaches und energetisch sehr effektives Verfahren, bei dem ein kleiner Wärmeüberschuss entsteht, was die Kühlzeit sehr kurz hält. Die Methode ist so für automatisierte Montagelinien geeignet. Mit dem Rotationsschweißen werden starke und hermetisch abgedichtete Schweißnähte hergestellt.

Die erste Anwendung vom Rotationsschweißen war die Herstellung von den mit Flüssigkeit gefüllten Kompassen. Dieses wird durch Schweißen unter der Flüssigkeitsoberfläche gemacht. Der Prozess kann so für die Abdichtung der Flüssigkeit im Behälter genutzt werden. Andere Anwendungen schließen die Kraftstofffilter, Rückventile, LkW-Leuchten, Aerosolflaschen und Schwimmer ein. Es

wird auch für die Montage von Konstruktionselementen, Verbindung von Ventilationsrohren zu den Blaskraftstoffbehältern oder beim Schweißen der Oberseiten und des Bodens von Containern verwendet.



Abb. 9.18 Anlage für Rotationsschweißen

9.1.6 Hochfrequenzschweißen

Das **Hochfrequenzschweißen**, auch *Radiofrequenzschweißen* oder *dielektrisches Schweißen* genannt, nutzt zur Herstellung der Wärme in den Werkstoffen elektromagnetische Energie mit hoher Frequenz (gewöhnlich 27,12 MHz) dank elektrischen Eigenschaften der Kunststoffe. Das geschweißte Material muss fähig sein ein elektrische Wechselfeld in Wärme umzuwandeln. Die Füge­teile werden zwischen zwei Elektroden gelegt, die das Wechselfeld bilden und in den Werkstoffen identische Orientation von Makromolekülen (sog. Elektronenpolarisation) hervorrufen. Die polaren Moleküle sind in dem Elektrofeld bestrebt sich in der Richtung seiner Einwirkung zu orientieren. Diesen Prozess nennen wir Dipol­polarisation und als Folge der Moleküldrehung kommt es zur gegenseitigen Reibung, wodurch Wärme entsteht. Der Schweißdruck zwischen den Elektroden führt dann zur Entstehung einer Schweißnaht.

Zum Hochfrequenzschweißen werden einfache Kompaktanlagen verwendet (siehe Abb. 9.19) und es erfordert nur Elektrik und Druckluft. Die Zykluszeit ist relativ kurz

(bis 20 Teilen pro Minute). Die Hochfrequenzschweißanlagen dienen nicht nur zur Herstellung von Schweißnähten. Die Elektroden können auch so gestaltet sein, dass sie durch eine Formschneide ergänzt werden, die parallel mit dem Schweißen das überschüssige Material abschneidet. Der Hauptnachteil des Hochfrequenzschweißens ist seine Begrenzung für Thermoplaste mit polaren Atomen in der makromolekularen Struktur (z.B. PVC, PA, PMMA, ABS). Beim Schweißen von unpolaren Thermoplasten wird ein weiteres Material in Form eines leitfähigen Composite-Implantats für die Kontaktfläche der Schweißnaht benötigt.

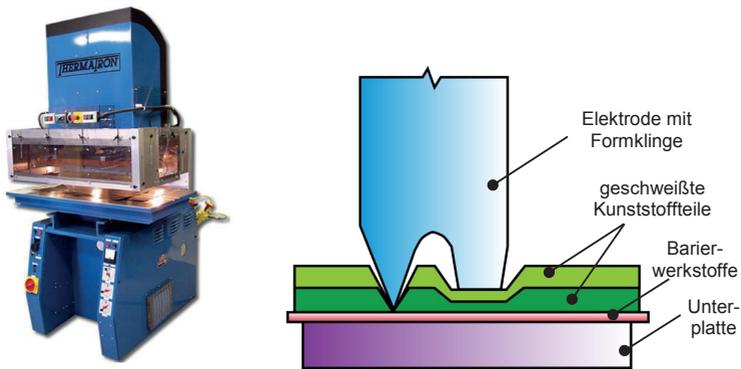


Abb. 9.19 Anlage für Hochfrequenzschweißen



Abb. 9.20 Anwendungen vom Hochfrequenzschweißen: Beutel für Blutaufbewahrung (links), Luftkissen (rechts)

Das Hochfrequenzschweißen wird gewöhnlich für Abdichtungen von dünnen Folien aus PVC-P oder für Papierprodukte, wie Ordner und verschiedene Hüllen verwendet. Zur weiteren Anwendung gehören aufblasbare Produkte: Strandbälle, Rettungswesten, Schlauchboote und Spielzeuge, im Gesundheitswesen z.B. Beutel für Blutaufbewahrung (siehe Abb. 9.20), Einwegkleidungen, Wasserbetten und Luftkissen (siehe Abb. 9.20).

9.1.7 Warmgasschweißen

Das **Schweißen mit Warmgas und Schweißzusatzstoff** ist ein Handprozess, bei dem die Schweißnahtqualität von der Fertigkeit und der Erfahrungen des Schweißers abhängt. Bei dem Verfahren wird das erwärmte Gas, meistens Luft, zum lokalen Schmelzen des Zusatzstoffes in einem Schweißdraht/-stäbchen (mit einem meistens runden, dreieckförmigen oder dreifachen Durchschnitt), aber auch zum Schmelzen der Füge Teile verwendet. Der Druck wird auf den Schweißdraht ausgeübt und der Schweißer muss auf eine gleichmäßige Erwärmung des Grundwerk- und des Schweißzusatzstoffes achten. Die Kombination von Wärme und Druck führt zur Vermischung des Schweißdrahts und des Grundmaterials. Bei dieser Methode kann man eine Festigkeit der Schweißnaht erreichen, die bis zu 90% der ursprünglichen Materialfestigkeit der geschweißten Teile entspricht. Der Schweißer sollte eine konstante Geschwindigkeit einhalten, damit die gleichmäßige Distribution von der Temperatur in der gesamten Schweißnaht garantiert wird. Der Schweißdraht und die Füge Teile sollten aus dem gleichen Thermoplast hergestellt werden und idealerweise auch des gleichen Typs sein. Vor dem Schweißen sollte die Oberfläche der Füge Teile gereinigt werden, damit sämtliche Verunreinigungen, wie Staub oder Fettreste, entfernt werden. Die gereinigten Teile und der Schweißdraht sollten außerdem abgekratzt werden, damit die potentielle oxidierte Schicht von der Oberfläche entfernt wird und eine entsprechende Qualität der Schweißnaht sichergestellt wird.

Schweißen kann man auf zwei Arten:

- **manuell mit dem Warmgas. Eine Kreisdüse**, die den Luftstrom in Richtung zur Fügefläche **und dem Schweißdraht** richtet,
- **Schweißdraht über eine Schnellschweißdüse** (siehe Abb. 9.21). Die Schnellschweißdüse ist ein spezieller Ansatz, der die Gasströmung an die Füge-

fläche richtet. Der Schweißdraht wird durch eine Vorkammer geleitet, die sich in der Mündung des Warmgases befindet. Die Schnellschweißdüse hilft die richtige Lage des Schweißgeräts und des Schweißdrahts zu halten.

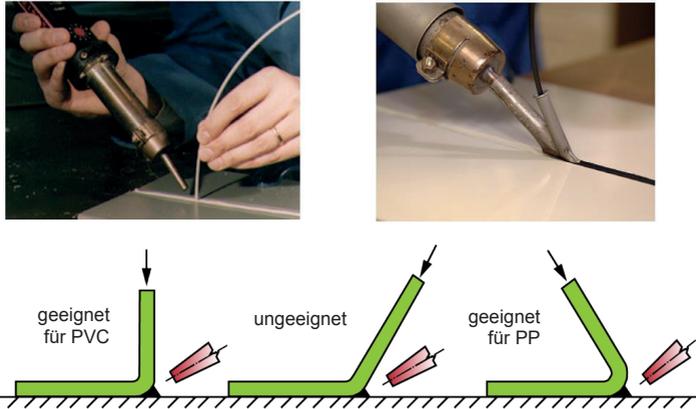


Abb. 9.21 Warmgasschweißen mit Runddüse und Schweißdraht (links), Warmgasschweißen mit Schweißdraht und Schnellschweißdüse (rechts)

Das Warmgasschweißen kann zum Schweißen von Füge­teilen praktisch jeder Form und Größe verwendet werden und das Schweißgerät hat wahrscheinlich die niedrigsten Kosten von allen Methoden des Kunststoffschweißens. Es können alle Arten von Polymeren geschweißt werden, die mit Wärme in einen thermoplastischen Zustand gebracht werden können. Zu den gängigsten Werkstoffen gehören PE, PP, PVC und Fluorplaste (PVDF, FEP, PFA und ECTFE). Die Warmgasschweißer mit Fremd- oder Eigenluftversorgung sind sehr leicht und einfach auch in komplizierten Lagen zu verwenden. Sie sind geeignet für Reparaturen im Terrain, oder wenn das Füge­teil zu groß ist, um in eine Werkstatt gebracht werden zu können. Die Schweißgeschwindigkeiten sind jedoch relativ langsam (im Vergleich zu anderen Techniken des Kunststoffschweißens) und die Qualität der Schweißnähte hängt von der Geschicklichkeit der Bedienung ab. Deswegen ist es wichtig, dass die Schweißer richtig geschult und zertifiziert werden.

Da der Warmgasprozess mit Schweißdraht ein manueller Prozess ist, ist er nicht für Serienfertigung geeignet. Es ist jedoch ideal für die Herstellung von verschiedenen Vertragsprodukten, da es jedem geschweißten Teil mit beliebiger

Geometrie angepasst werden kann. Zu den Beispielen gehören chemische Lagerungsbehälter, Rohrleitungen, Absaugsysteme und Bank für Halbleiterindustrie. Weiterhin wird es für das Schweißen von thermoplastischen Membranen für Dächer, Pools und Gartenteiche, Verkleidungen für chemische Behälter verwendet. Und es kann auch zum Reparieren von Teilen der Automobilindustrie dienen, wie Stoßstangen oder Flüssigkeitsbehälter.

9.1.8 Extrusionsschweißen

Das **Extrusionsschweißen** wird zum Schweißen von PP und PE-HD verwendet. Es wird gewöhnlich von Hand gemacht, obwohl es auch teilmechanisiert werden kann. Bei dieser Technik wird das geschmolzene Thermoplast aus dem gleichen Material (idealerweise auch gleichen Typs) wie die Füge Teile in die vorbereitete Schweißverbindung zwischen die Füge Teile mit einem Extrusionsschweißgerät kontinuierlich extrudiert (siehe Abb. 9.22).



Abb. 9.22 Extrusionsschweißgerät

Die Füge Teile werden auf deren Schmelztemperaturen mit einem Heißluftstrom erwärmt und das extrudierte Material zu der Fügefläche zugeleitet. Für die Entstehung einer richtigen Schweißnaht ist es notwendig, dass das extrudierte Material an die Fügezone eingepresst wird. Damit wird sichergestellt, dass sich die Füge Teile miteinander verbinden und eine Schweißnaht gebildet werden kann (siehe Abb. 9.23). Sowie beim Warmgasschweißen werden die Füge Teile zunächst

gereinigt, abgekratzt und bearbeitet, sodass ein v-förmiger Spalt entsteht. Am Anfang vom Schweißzyklus werden zuerst vom Bediener die Fügeteile mit einer feinen Bewegung des Schweißgeräts entlang der Verbindungsfläche erwärmt. Sollte man diesen Arbeitsschritt weglassen, würde das Material auf kaltes Material der Fügeteile aufgetragen werden, was eine Schweißnaht von minderer Qualität herstellen würde.

Der größte Vorteil des Extrusionsschweißens (im Vergleich zum Warmgasschweißen) ist die Herstellung einer kontinuierlichen Schweißschicht in einem einzigen Durchgang, im Vergleich mit den Mehrfachdurchgängen beim Warmgasschweißen. Die Produktionszeit ist deutlich kürzer als beim Warmgasschweißen. Dank leichter Kontrolle der Schweißparameter ist die Maximalstärke der Schweißnaht größer als beim Warmgasschweißen. Ein deutlicher Nachteil des Extrusionsschweißens (im Vergleich zum Warmgasschweißen) ist das Gewicht und die Größe des Schweißgeräts. Manche Extrusionsschweißgeräte können mehr als 12 kg wiegen.

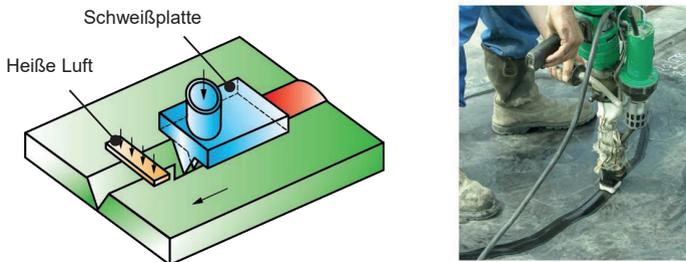


Abb. 9.23 Extrusionsschweißen



Abb. 9.24 Anwendungen des Extrusionsschweißens

Das Extrusionsschweißen wird bei der Herstellung von großen Kunststoffbauteilen, wie z.B. einem Tank oder einer Rohrleitung, angewendet. Bei solchen Bauteilen ist es notwendig, relativ große Menge von homogenen Schweißnähten bei einem Durchgang herzustellen. Immer häufiger findet dieses Schweißverfahren Anwendung in Umweltbereichen, sowie in Land- und Wasserwirtschaft, v.a. für Drainagesysteme und große Behälter (siehe Abb. 9.24).

9.1.9 Laserschweißen

Das **Laserschweißen** gehört zu den sich dynamisch entwickelnden Methoden, die insbesondere in der Industrie Anwendung finden, wo wiederholt große Umfänge der gleichen Halbzeuge geschweißt werden. Dieses Verfahren ist zum Fügen von Folien, Platten und Spritzgussteilen geeignet. Das Prinzip des Verfahrens besteht in dem Schmelzen der Kunststoffe in der Schweißnahtzone mit Laserlicht und einem folgenden Zusammenpressen der Fügeteile. Die Laser können eine kontrollierte Energiemenge auf konkrete Stellen richten dank der Einstellung der Strahlgröße (Breite von 10 μm ÷ 100 mm) und der breiten Auswahl von Methoden für eine direkte Positionierung und Bewegung des Lichts. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Varianten von Laserschweißen: **direktes Laserschweißen** und **Laserdurchstrahl-schweißen**.

Beim Kontakt des Laserlichts mit der Materialoberfläche wird ein Teil der Energie der Laserstrahlung widergespiegelt, ein Teil absorbiert (in Wärme umgewandelt) und ein Teil der Energie dringt in die Tiefe des Werkstoffes ein (Transmission). Beim Laserschweißen muss die Energie effektiv an der richtigen Stelle absorbiert werden. Die Wechselwirkung des Lichts mit der Oberfläche ist von den folgenden Faktoren abhängig: *Materialtyp und Inhalt der Schweißzusätze, einschließlich der Oberflächenschichteinwirkung, Wellenlänge und Intensität vom Laserlicht* (Leistung, Größe oder Form der Stelle, Qualität des Laserlichts) *und Geschwindigkeit der Lichtbewegung über der Oberfläche*.

Die auf der Kunststoffoberfläche absorbierte Laserstrahlung kann eine von zwei Wechselwirkungen in Abhängigkeit von der Wellenlänge hervorrufen. Bei der Kurzwellenstrahlung (< 350 nm oder Ultraviolettstrahlung) kommt es zu *photo-lytischen Prozessen*, bei denen die Photonenenergie ausreichend groß ist, damit die

chemischen Bindungen der Makromoleküle direkt aufgebrochen werden. Dies kann als Laser-Kaltdraht-Schweißen bezeichnet werden und bei Bearbeitung, chemischer Aushärtung oder anderen chemischen Kunststoffänderungen (z.B. Kennzeichnung mit Farbenänderung) eingesetzt werden. Bei der *Langwellenstrahlung* ($> 350 \text{ nm}$, ins Infrarotspektrum erstreckend) kommt es zu *pyrolytischen Prozessen*, die eine Erwärmung einschließen. Dieses kann für das Materialschmelzen und somit für ihre Schweißung oder bei hoher Intensität auch für die Durchschneidung der Teile mit Hilfe eines Lasers verwendet werden. Beim Laserstrahlschweißen wird also die Infrarotstrahlung verwendet.

In der Praxis werden vor allem Nd:YAG, Dioden- und CO_2 -Laser benutzt. Die ersten zwei Konstruktionen werden zum Durchstrahlschweißen und die dritte zum Direktschweißen (Stumpfschweißen) verwendet. Beim *direkten Schweißen mit dem CO_2 Laser* (siehe Abb. 9.25) wird eine Strahlung mit einer Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ emittiert, die an der Oberfläche des Kunststoffteils absorbiert wird. Die Laserkonstruktion eignet sich gut für das Schweißen von dünnwandigen Folien und zum Schneiden verschiedener Kunststoffarten.

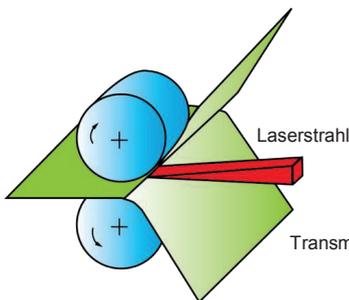


Abb. 9.25 Direktes Schweißen mit CO_2 Gaslaser

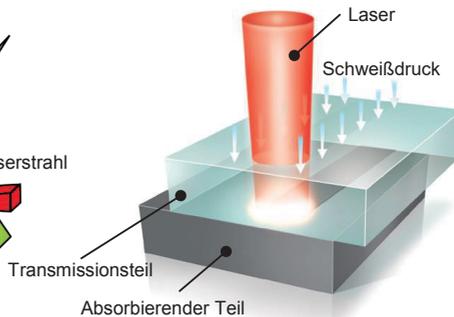


Abb. 9.26 Laserdurchstrahlschweißen

Das *Laserdurchstrahlschweißen* wird für industrielles Fügen von Thermoplasten, mit Hilfe von Laserquellen mit Wellenlänge von $0,8$ bis $1,1 \mu\text{m}$, angewendet. Benutzt werden Diodenlaser, feste Nd:YAG und Faserlaser. Die Radiation wird bei diesen Wellenlängen schwerer absorbiert. Die Kunststoffe werden deswegen mit Zusatzstoffen modifiziert, die die Laserstrahlung absorbieren, bzw. werden in Verbindung mit dünnen Oberflächenschichten angewendet. Die Füge­teile werden

beim Schweißen je nach Bedarf positioniert und das Laserlicht tritt durch die obere Schicht hindurch, damit die Schweißnähte auf der absorbierenden Oberfläche des unteren Teils erwärmt werden (siehe Abb. 9.26).

Das Laserschweißen wird bei großer Zahl von Anwendungen eingesetzt: elektronische Verpackungen, Textilien, biomedizinische Geräte, Nahrungsmittel- und medizinische Verpackungen, Displays, Automobilkomponenten usw.

9.2

Kleben von Kunststoffen

Das **Kleben** ist die vielseitigste der Verbindungstechniken und kann zur Verbindung der Kunststoffteile miteinander oder mit anderen Werkstoffen, wie z.B. mit Metallen, Keramik oder Holz eingesetzt werden. Das Kleben ist ein Prozess der Verbindung von Oberflächen (Substrate - Adhärenten) mit Hilfe von Klebstoffen (Adhäsivstoffe). Festigkeit und mechanische Eigenschaften der Klebverbindung sind von den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Klebstoffs und des verbindenden Materials abhängig. Den entscheidenden Einfluss hat die Adhäsion, die Haftung des Klebstoffes zu dem Teil, und Kohäsion, der Zusammenhalt des Klebstoffs (die Partikel werden durch zwischenmolekulare und Valenzkräfte zusammengehalten). In der Praxis unterscheiden wir zwischen den mechanischen Adhäsionskräften, die von mechanischer Haftung (Verankerung) des Klebstoffes in Unebenheiten und Poren der verbundenen Werkstoffe herkommen, und spezifische Adhäsionskräfte, die aus chemischen Kräften (z.B. primäre chemische Bindungen) und physikalischen Kräften (zwischenmolekulare Van-Der-Waals Kräfte, Diffusionskräfte, elektrostatische Kräfte usw.) bestehen.

Sehr starke Adhäsionskräfte sind nicht immer vom Vorteil. In vielen Fällen sind diese Kräfte stärker als die Kohäsionskräfte des Klebstoffs (Adhäsivstoffe) oder des geklebten Kunststoffes (Adhärent). Eine Verletzung der Verbindung tritt dann eher in dem Adhäsiv (Klebstoff) oder dem Adhärent (Substrat) als in der Verbindungsschicht auf. Die Adhäsionskraft auf der Interphase wird dazu noch durch Vorbehandlung der Oberfläche der geklebten Teile (Ätzen, Anrauen, Abrasion, usw.) erhöht, was die Herstellung mechanischer Adhäsion zur Folge hat.

Grundvoraussetzung einer guten Adhäsion ist, dass die Oberfläche zwischen dem Klebstoff und dem Adhärent ausreichend benetzt wird. Die Benetzbarkeit bezieht sich auf die Verteilung der Flüssigkeit auf der festen Oberfläche und wird dann erreicht,

wenn die Oberflächenspannung des flüssigen Adhäsivs (Klebstoffs) kleiner ist als die Oberflächenspannung (oder -energie) des Adhärens (Substrats). Es gibt dann beim Substrat genügend Oberflächenspannung, damit eine größere Fläche der Flüssigkeit in Kontakt mit der Fläche des Substrats kommt. Beispiele der Oberflächenenergie für übliche Adhäsive, Adhärenze und Flüssigkeiten sind in der Tab. 9.3. angeführt. Eine gute Benetzbarkeit der Oberfläche wird dann erreicht, wenn der Randwinkel zwischen dem Substrat und dem Flüssigkeitstropfen kleiner als 60° ist. Schlechte Benetzbarkeit entsteht bei Randwinkeln über 90° (siehe Abb. 9.27). Die Oberflächenenergie von jedem Adhärenz (Substrat) ist mit seiner chemischen Zusammensetzung verbunden. Mit einer Vorbehandlung der Substratoberfläche kann man die Benetzbarkeit des Klebstoffs verbessern.

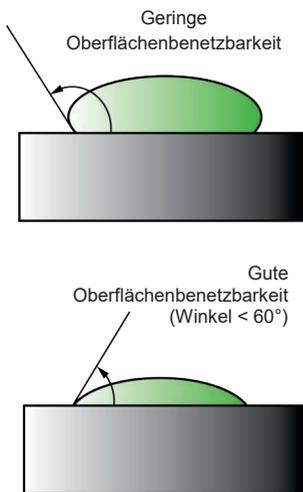


Abb. 9.27 Oberflächenbenetzbarkeit

Tab. 9.3 Oberflächenergie von ausgewählten Materialien

Werkstoff	Oberflächeenergie	
	dyn/cm	mJ/m ²
PTFE	18	0,018
Q	24	0,024
EPM	28	0,028
PE	31	0,031
PS	33	0,033
SBR	33	0,033
ABS	35	0,035
PMMA	39	0,039
PVC	39	0,039
PI	40	0,040
PET	43	0,043
PA	46	0,046
PC	46	0,046
EP	47	0,047
H ₂ O	73	0,073
Al	~ 500	~ 0,500
Cu	~ 1000	~ 1,000

Obwohl das Kleben vor allem ein chemisches Verfahren ist, das auf der Materialoberfläche stattfindet, ist die Qualität der Klebverbindung von der Vorbehandlung der Substratoberfläche und von den für die Handhabung, Erstarrung

und Aushärtung des Klebstoffs verwendeten Verfahren abhängig. Die Substratoberflächen müssen aufgeraut werden, damit die Oberfläche größer wird und Poren für die Haftung vom Klebstoff entstehen.

9.2.1 Einfluss der Kunststoffe auf die Festigkeit der Klebverbindung

Die Festigkeit der Klebverbindung ist, neben guter Benetzbarkeit des Klebstoffs mit der geklebten Oberfläche (Adhäsion) und Kohäsion des Klebstoffs und der Oberflächenvorbehandlung vom Substrat, von der chemischen und molekularen Struktur des Kunststoffs abhängig. **Unpolare Kunststoffe** (z.B. PE, PP, PTFE) **werden nur sehr schlecht** (oder sogar überhaupt nicht) **verklebt**. Ihre Oberfläche wird deswegen durch Oxidation (z.B. Beflammung oder elektrische Entladung bei Anwesenheit des Luftsauerstoffs) vorbehandelt, die eine lokale und zeitbegrenzte Polarität auf der Kunststoffoberfläche hervorruft. Die Klebfähigkeit kann auch durch Eintauchen der Teile ins Beizbad (zusammengesetzt z.B. aus Schwefelsäure, Kaliumdichromatlösung und destilliertem Wasser im vorgeschriebenen Verhältnis und Konzentration) bei erhöhter Temperatur (wenigstens 70 °C) oder durch Zugabe der polaren Füllstoffe, Weichmacher usw. verbessert werden. Auf der anderen Seite können die Weichmacher in die Klebstoffschicht übergehen und die Verbindung ganz beschädigen. **Sehr gut werden schwach bis mittel polare Kunststoffe** (z.B. PVC, ABS, PS, PMMA, EP) bei Verwendung von polaren Klebstoffen der gleichen Herkunft verklebt. **Die stark polaren Kunststoffe** (insbesondere PA) **werden schlechter als die schwach polaren verklebt**. Die Klebefähigkeit von Kunststoffen wird auch mit höherer Kristallisation schlechter. Für die Festigkeit der Klebverbindung und ihre Lebensdauer sind auch innere Spannungen, zu den es aus verschiedenen Gründen kommen kann (z.B. durch Verklebung von Werkstoffen mit unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten), entscheidend.

9.2.2 Klebstoffarten

Grundlage für eine erfolgreiche Klebverbindung ist die Wahl vom Klebstoff, der sich mit seinen Eigenschaften möglichst viel dem zu verklebenden Substrat

(Adhärenzen) annähert. Die Richtlinie DVS 2204 untergliedert die Klebstoffe in folgende Gruppen:

- **Lösemittelhaltige Nassklebstoffe**

Es handelt sich um Polymerlösungen in organischen Lösemitteln, bzw. eigene Lösemittel, die die zu verbindenden Oberflächen ätzen, wobei es nach dem Zusammenpressen und der Verdunstung der Lösemittel zur Herstellung einer festen Klebverbindung kommt. So werden viele Polymertypen, z.B. PA 6.6 mit konzentrierter Ameisensäure, PMMA mit Chloroform usw. verklebt.

- **Adhäsive Klebstoffe**

Adhäsionsklebstoffe werden in Form von Lösungen, Dispersionen und Schmelzen verarbeitet. Sehr oft werden sie auf das Grundlagenmaterial (Papier, Folie, Textil) aufgetragen. Nach ihrer Aufwicklung entstehen Klebebänder oder in der flachen Form Etiketten oder Schilder. Die Klebebänder sind weich, dauerhaft klebrig und haben eine geringe Kohäsion bei relativ guter Haftung. Diese Klebstoffe werden für die Verbindung von nicht vorbehandelten Flächen verwendet.

- **Kontaktklebstoffe**

In den meisten Fällen handelt es sich um Lösemittelklebstoffe (Polymerlösungen in organischen Lösemitteln, die vor Gebrauch oft mit Härtern vermischt werden). Sie werden auf beide Fügeteile, die vorbehandelt wurden, aufgetragen, und nach Verdunstung des Lösemittels werden die festen Filmschichten durch ein kurzes Drücken fest verklebt. Hauptvertreter der Kontaktklebstoffe sind die Polyurethan-Klebstoffe, Polychloropren-Klebstoffe und Nitril-Kautschuk-Klebstoffe.

- **Schmelzklebstoffe**

Grundlage der Schmelzklebstoffe ist der Thermoplast, der vor Anwendung in einer Schmelzklebepistole geschmolzen, auf eine der Klebeflächen aufgetragen wird. Nach ihrer Verbindung, Abkühlen und Erstarren des Klebstoffs entsteht eine Klebverbindung. Die Schmelzklebstoffe werden z.B. aus Polyethylen, Polyurethanen, Polyamiden usw. hergestellt.

- **Reaktionsklebstoffe**

Die Reaktionsklebstoffe polymerisieren durch Einwirkung äußerer Faktoren (meistens Luftfeuchtigkeit, Temperatur, UV-Strahlung und Licht) - sog.

Einkomponenten-Reaktionsklebstoffe oder durch Vermischung der Grundkomponenten in exaktem Verhältnis - sog. *Mehrkomponenten-Reaktionsklebstoffe*. Für das Fügen beider Flächen ist der übermäßige Druck unerwünscht. Die Füge­teile werden durch einen konstanten Druck (ca. 1 N/cm^2) über die ganze Härtezeit fixiert.

Einkomponenten-Reaktionsklebstoffe (Polyurethan-, Cyanacrylat- Sekundenkleber) werden dem Verbraucher in luftdichten Verpackungen geliefert. Die chemische Reaktion (Aushärten) fängt beim Kontakt mit der Luftfeuchtigkeit (ohne Zugabe der Härter) an und verläuft sehr schnell. Je nach Zusammensetzung der Reaktanten entstehen harte bis weiche elastische Filme.

Zweikomponenten-Reaktionsklebstoffe werden meistens getrennt als zwei Komponenten geliefert: Harz und Härter. Da die Klebstoffe nach Vermischung der Komponenten eine Erhöhung der Viskosität zur Folge haben, sind diese nur für eine begrenzte Zeit verwendbar. Es gehören hier vor allem *Epoxide*, die schon als viskose Flüssigkeiten und Aushärtungszusatzstoffe oder Pulver, bzw. Klebfolien geliefert werden. Sie enthalten schon den Härter, der sich bei erhöhter Temperatur aktiviert. Ein wichtiger Anwendungsbereich sind die Glaslamine. Sie werden auch zum Verkleben von Duroplasten, Metallen, Glas und Holz verwendet. Zu weiteren Mehrkomponenten-Reaktionsklebstoffen gehören die *Polyurethan-Klebstoffe* (aus Polyol und Isocyanat zusammengesetzt) und *Klebstoffe auf Basis ungesättigter Polyester* (Grundkomponenten sind die Polyester-Harze, die aus dem ungesättigten Polyester im Reaktionslösemittel vorbereitet und in organischen Peroxiden ausgehärtet werden).

9.2.3 Konstruktion von Klebverbindungen

Bei der Gesamtfestigkeit einer Klebverbindung spielt auch die richtige Wahl ihrer Form die entscheidende Rolle. Formen der einzelnen Verbindungen werden je nach Art des Halbzeugs, Abmessungen der Klebefläche, Klebstoffart und mechanischer, bzw. chemischer Belastung der Klebefläche bestimmt. Teile, die bei ihrer Montage Schälkräften ausgesetzt sind, sind nicht zum Verkleben geeignet. Eine mechanische Belastung des Füge­teils muss gleichmäßig verteilt werden und darf nicht nur auf die Klebefläche konzentriert werden. Klebverbindungen sollten auf Zug und Scherung

beansprucht werden, Schälbeanspruchung ist zu vermeiden. Die häufigsten Formen der Klebeflächen sind in der Abb. 9.28 gezeigt.

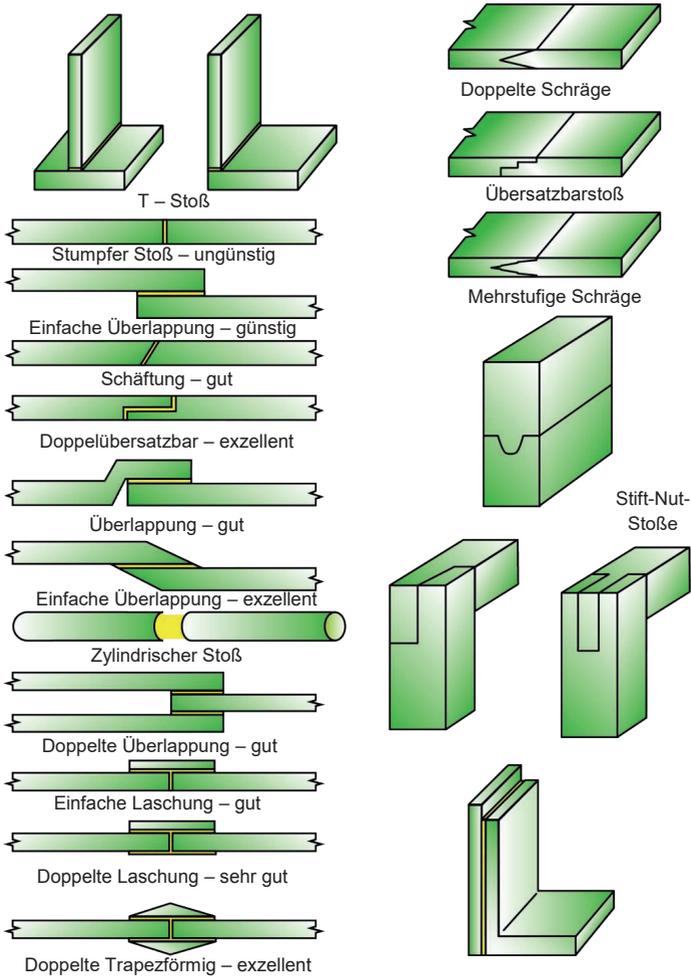


Abb. 9.28 Beispiele der Klebeverbindungen

9.2.4 Anwendung der Klebverbindungen

Das Kleben kann zur Verbindung von Folien, Platten, Geweben, Teilen mit ungewöhnlicher Form oder Konfiguration, wie Sandwichelemente und Lamine für den Flugzeugbau, Holzlamine, Schleifscheiben, Schleifpapiere und Schichtfolien, angewendet werden. Anwendungen, wo Polymere mit Klebstoffen verbunden werden, sind unglaublich vielfältig und schließen folgende Produkte ein: Kosmetische Dosen, Belichtung, optische Komponenten, Sportausstattung, Spielzeuge usw. Konstruktionsklebstoffe werden in dem Flugzeugbau, in der Automobil-, Sport- und Verbrauchsgüterindustrie für Verbindungen von Konstruktionselementen verwendet. Die Klebstoffe werden auch bei der Zusammensetzung von medizinischen Komponenten, wie orthopädische Schellen, Hörapparate, Wechsler, Infusions-Anlagen und -Pumpen, medizinische Elektroanlagen, Katheter, und auch zur Verbindung von Kunststoffnadeln von korrosionsfestem Stahl in Plastikhüllen verwendet. Die Automobilanwendungen schließen z.B. Verbindungen der zweiseitigen thermoplastischen Stoßfänger und der mit Windschutzscheiben verbundenen Rückspiegel ein.

Zu den Vorteilen der Klebstoffanwendung gehört eine schnellere Montage von Bauteilen, Kompensierung ihrer Toleranzen und die Tatsache, dass keine Löcher für ihren mechanischen Aufbau usw. hergestellt werden müssen. Nachteile der Klebverbindungen sind dagegen ihre begrenzte Lebensdauer, die benötigte gründliche Vorbehandlung der Oberfläche und manchmal auch lange Härtezeiten. Die Verwendung der Klebstoffe kann ein unsauberer Prozess sein, der eine umfassende Reinigung erfordert und während der Aushärtung von Klebstoffen können Lösemittel verdunsten. Zum Erreichen einer optimalen Festigkeit der Klebverbindung muss eine ausreichend große Klebefläche sichergestellt werden (Kompaktheit der Klebverbindung ist nicht einfach zu kontrollieren). Zwischen dem Polymer und einigen Klebstoffen können Spannungsrisse entstehen (meistens vor, aber auch während der Härtung), die die Eigenschaften der Klebverbindung negativ beeinflussen.

- [1] ADAMS, Robert D. *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier, 2005. ISBN 9781855737419.
- [2] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-77-9.
- [3] AVERY, Jack. *Gas-assist injection molding: a principles and applications*. Munich: Hanser, 2001. ISBN 9781569902981.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymer*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [5] BELCHER, Samuel L. *Practical extrusion blow molding*. New York: Marcel Dekker Inc., 1999. ISBN 0-8247-1997-2.
- [6] BELCHER, Samuel L. *Practical guide to injection blow molding*. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 0-8247-5791-2.
- [7] *Blow moulding processing manual*.
Verfügbar unter: [<http://www.leaktesters.co.uk>]
- [8] BOBEK, Jiří. *Vstříkovací formy pro zpracování termoplastů*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [9] BRANDAU, Ottmar. *Stretch blow molding*. Boston: Elsevier/William Andrew, 2017. ISBN 978-0323-46177-1.
- [10] BRDLÍK, Pavel. *Aplikace CO₂ interního chlazení ve vyfukovacím procesu*. Liberec, 2015. Dissertation. Technische Universität in Liberec.
- [11] BROCKMANN, Walter, GEIß, Paul Ludwig, KLINGEN Jürgen und K. Bernhard SCHRÖDER. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Wiley, 2008. ISBN 978-3-527-62393-8.
- [12] CANTOR, Kirk. *Blow film extrusion*. Munich: Hanser, 2011. ISBN 978-3-446-41705-2.
- [13] CRAWFORD, Roy J. und James L. THRONE. *Rotational molding technology*. Norwich: Plastic Design Library/William Andrew Pub., 2002. ISBN 1884207855.
- [14] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for engineers: materials, properties, applications*. Munich: Hanser, 1993. ISBN 3-446-15723-9.
- [15] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymer – výroba, vlastností, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [16] ENGELMANN, Sven. *Advanced thermoforming: methods, machines and materials, applications and automation*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2012. ISBN 978-0-470-49920-7.
- [17] *Extrusion procesing*. Verfügbar unter: [<https://www.slideshare.net>].
- [18] GREWELL, David und Avraham BENATAR. Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International Polymer Processing*. 22(1), 43-60, 2007.
- [19] HABENICHT, Gerd. *Applied adhesive bonding: a practical guide for flawless results*. Wiley, 2008. ISBN: 9783527320141.

- [20] HAQUE, Md Shakibul und Mohd Anees SIDDIQUI. Plastic welding: important facts and developments. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(2), 15-19, 2016.
- [21] CHUNG, Chan I. *Extrusion of polymers: theory and practice*. Munich: Hanser, 2011. ISBN 978-1-56990-459-6.
- [22] JAROSCHEK, Christoph. Fast-cycle injection moulding machines with tandem moulds. *Kunststoffe Plast Europe* 93(3), 22-23, 2003.
- [23] KLEIN, Peter. *Fundamentals of plastic thermoforming*. California: Morgan and Claypool, 2009. ISBN 978-1-598-29884-0.
- [24] KLEIN, Rolf. *Laser welding of plastics*. John Wiley and Sons, Inc., 2012. ISBN: 978-3-527-40972-3.
- [25] KOLOUCH, Jan. *Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstříkváním*. Praha: SNTL, 1986.
- [26] KOLOUCH, Jan. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL, 1981.
- [27] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: TU Liberec, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [28] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: VŠCHT Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [29] LAFLEUR, Pierre G. und Bruno VERGNES. *Polymer extrusion*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 1998. ISBN 978-1-84821-650-1.
- [30] LEE, Norman C. *Understanding blow molding*. Munich: Hanser, 2007. ISBN 3-446-41265-4.
- [31] LENFELD, Petr. *Technologie II.: Část 2. (Zpracování plastů)*. Liberec: TU Liberec, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [32] LENFELD, Petr. *Technologie vstříkování*. Svitavy: SOU Svitavy, 2015. ISBN 978-80-88058-74-8.
- [33] LIPTÁKOVÁ, Tatiana, Pavol ALEXÝ und andere. *Polymérne konstrukčné materiály*. Žilina: ŽU Žilina, 2012. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [34] LOYDA, Miloslav und andere. *Svařování termoplastů*. Praha: UNO Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [35] MALLON, J. M. *Advances in automation for plastic Injection Molding*. New York: Rapra Technology, 2011. ISBN 1-85957-283-9.
- [36] MENNIG Günter und Klaus STOECKHERT. *Mold-making handbook*. Munich: Hanser, 2013. ISBN 978-1-56990-446-6.
- [37] MURALISRINIVASAN, Natamai Subramanian. *Update on troubleshooting in Thermoforming*. Shawbury: iSmithers Rapa, 2010. ISBN 978-1-84735-137-1.
- [38] OSSWALD, Tim A., TURNG Lih-Sheng und Paul J. GRAMANN. *Injection molding handbook*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 9781569904206.
- [39] RAAB, Miroslav. *Materiály a člověk: (netradiční úvod do současné materiálové vědy)*. Praha: Encyklopedický dům, 1999. ISBN 80-860-4413-0.
- [40] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer extrusion*. Munich: Hanser, 2014. ISBN 978-1-56990-516-6.

- [41] ROSATO, Dominick V., ROSATO, Andrew V. und David P. DI MATTIA. *Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation*. Munich: Hanser, 2004. ISBN 1-56990-343-3.
- [42] ROSATO, Dominick V. *Extruding practices, A practical processing handbook*. Berlin: Springer, 1998. ISBN 978-0-412-82810-2.
- [43] ROSATO, Dominick V. und Andrew V. ROSATO. *Injection molding handbook*. New York: Springer 2000. ISBN 978-1-4615-4597-2.
- [44] ROSEN, Stanley R. *Thermoforming: Improving process performance*. Dearborn, Michigan: Plastics Molders and Manufacturers Association of SME, 2002. ISBN 0-87263-582-1.
- [45] *Screw extrusion technology – past, present, future*.
Verfügbar unter: [en.www.ichp.pl]
- [46] *Selecting polystyrene foam where moisture exposure occurs*.
Verfügbar unter: [https://www.constructionspecifier.com/selecting-polystyrene-foam-where-moisture-exposure-occurs/]
- [47] SIKORA J. W. *Design of extrusion heads*, Lublin: Politechnika Lubelska, 2018.
- [48] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, Nr. 1. ISSN 1212-2572.
- [49] STEVENSON, James F. *Innovation in polymer processing: molding*. Munich: Hanser, 1996. ISBN-13 978-3446174337.
- [50] *Thermosetting polymers – rheological testing*. TA Instruments, 2015.
Verfügbar unter: [https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12103]
- [51] THORNE, James L. *Technology of thermoforming*. Munich: Hanser, 1996. ISBN 3-446-17812-0.
- [52] THRONE, James L. *Understanding thermoforming*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-3-446-10796-1.
- [53] TROUGHTON, Michael John. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. Cambridge, UK: TWI/The Welding Institute, 2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [54] WILSON, Helen J. *Problem plastics – and how mathematics can help*.
Verfügbar unter: [http://www.ucl.ac.uk/~ucahwwi/uclscience.html]
- [55] ZEMAN, Lubomír. *Vstříkování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

Technische Dokumentation von:

ARBURG GmbH & Co. KG | ASH Industries | BOCO PARDUBICE Machines s.r.o. | Conair | CZ Plast s.r.o. | ENGEL AUSTRIA GmbH | GDK s.r.o. | Graham Engineering Corporation | Chevron Phillips Chemical Company | Insulation Corporation of America | KraussMaffei Technologies GmbH | KUBOUŠEK Systems s.r.o. | Kunststoff Helmbrechts AG | Mold Hotrunner Solutions Inc. | T/Mould Solution GmbH & CoKG | TiK-Technologie in Kunststoff GmbH | Trexel Inc. | Yantai Huantong Rotational Molding Equipment Co., Ltd.

Titel	Einführung in die Kunststofftechnologien
Autoren	Ing. Luboš Běhálek, Ph.D. Ing. Pavel Brdlík, Ph.D. Ing. Martin Borůvka Ing. Irena Lenfeldová, Ph.D.
Bestimmt für	Studierende der Fakultät für Maschinenwesen der TU in Liberec und HS Zittau/Görlitz
Herausgeber	Technische Universität in Liberec Studentská 1402/2, Liberec
Genehmigt von	Rektorat der TUL am 15. 2. 2019, Ref.-Nr. RE 6/19
Erscheinungsdatum	März 2019
Umfang	185 Seiten
Auflage	erste
Auflagenummer	55-006-19
Druckerei	Vysokoškolský podnik Liberec, s.r.o. Studentská 2, CZ-Liberec

Diese Publikation wurde nicht redaktionell überarbeitet und korrigiert.

ISBN 978-80-7494-459-8

