



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  
Jiří Habr

# MODERNE KUNSTSTOFFE UND FASERVERBUNDE

## TEIL I.

### KUNSTSTOFFSPRITZGUSS: WERKSTOFFE UND VERFAHREN



# Moderne Kunststoffe und Faserverbunde

## *Teil I. Kunststoffspritzguss: Werkstoffe und Verfahren*

---

Luboš Běhálek • Jiří Habr



Autoren: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.  
Ing. Jiří Habr, 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: *Ing. Pavel Petera, Ph.D.*  
Korrektur: *Dipl.-Ing. (FH) Paul Falkenhain*

© Luboš Běhálek, Jiří Habr (Technische Universität in Liberec) – 2019

**ISBN 978-80-7494-457-4**

# Vorwort

Kunststoffe und ihre Verbundwerkstoffe sind Werkstoffe, die erst vor relativer kurzer Zeit entstanden sind, unglaublich schnell Verbreitung gefunden haben und deren Entwicklung und Verarbeitungstechnologien ein großes Tempo vorlegen. In zahlreichen Anwendungen sind sie kaum zu ersetzen. Kunststoffe bilden unsere Kultur, Werte und Fähigkeiten und haben zu einer Revolution im Industriedesign und in der Industriekunst geführt; sie ermöglichen innovative Anwendungen, die mit klassischen Metallwerkstoffen gar nicht denkbar wären und tragen nicht zuletzt einen Anteil am medizinischen Fortschritt und der menschlichen Gesundheit. Es handelt sich um Werkstoffe, die zu einem Begriff des 20. Jahrhunderts geworden sind – mit einem progressiven Übergang ins heutige Jahrhundert. Zur treibenden Kraft ihrer Entwicklung wurde die Erzielung neuer Werkstoffgrenzen bei Eigenschaften, die die Anwendung von Kunststoffen auch an hoch mechanisch, thermisch und chemisch beanspruchten Bauteilen im Maschinenwesen und in der Biomedizin ermöglichen. Diskussionen in Fach- und Medienkreisen zum Thema Kunststoffe konzentrieren sich immer mehr auf den Bereich Umweltschutz, weniger Beachtung findet ihr Beitrag zum technischen Fortschritt, insbesondere in der Maschinen- und Elektrotechnikindustrie. Die ökologischen Einwände haben natürlich ihre Berechtigung, und zwar vor allem in der Verpackungsindustrie – im Maschinenwesen sind sie kaum von Relevanz. Eine der Möglichkeiten, wie man im Bereich Verpackungs- und Konsumgüterindustrie zu einer umweltverträglichen Lösung beitragen könnte, ist die Entwicklung von Polymeren mit einer gesteuerten bzw. vorbestimmten Lebensdauer, also biologisch abbaubaren Kunststoffen.

Die Entwicklung von Kunststoffen geht Hand in Hand mit einer dynamischen Entwicklung ihrer Verarbeitungstechnologien. Die meistverbreitete Technologie in diesem Segment ist das Spritzgießen, das mit einer ganzen Reihe von innovativen Verfahren einhergeht.

Der erste Teil des Skriptums „Moderne Kunststoffe und Faserverbunde“, der für Studenten des Masterstudiengangs an der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität in Liberec und der Hochschule Zittau/Görlitz bestimmt ist, beschäftigt sich mit den Eigenschaften, Anwendungen und Spritzgusstechnologien zukunftssträchtiger polymerer Werkstoffe auf der Basis von Thermoplasten. Das Ziel des Skriptums ist eine Erweiterung der im vorausgegangenen Studienabschnitt

erlangten Kenntnisse, sein Inhalt ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit zwischen den Partnerhochschulen im Lehrbereich Kunststoffe und deren Verbundwerkstoffe für Maschinenbauer in Liberec und Zittau.

*Luboš Běhálek*

## **Danksagung**

Unser besonderer Dank gilt Pavel Brdlík von der Technischen Universität in Liberec für die grafische Aufbereitung der ausgewählten Bilder im Kapitel 5.

# Inhalt

<b>1 Polymermaterialien – Einführung</b>	<b>1</b>
<i>Luboš Běhálék</i>	
1.1 Spezielle Metallocen-katalysierte Kunststoffe	5
1.2 Zuzügliche Vernetzung von Polymeren	6
<b>2 Polymerblende</b>	<b>9</b>
<i>Luboš Běhálék</i>	
<b>3 Hochleistungspolymere</b>	<b>17</b>
<i>Luboš Běhálék</i>	
3.1 Fluorkunststoffe	17
3.2 Polyphenylensulfid (PPS)	20
3.3 Polyphtalamide (PPA)	22
3.4 Aromatische Polyamide (MPIA; PPTA)	23
3.5 Flüssigkristalline Polymere (LCP).	25
3.6 Polyaryletherketone (PAEK)	27
3.7 Polyphenylenether (PPE)	29
3.8 Polysulphone (PSU)	30
3.9 Polyimide (PI) und Polyetherimide (PEI)	31
3.10 Polyphenylensulfone (PPSU)	33
3.11 Polyamidimide (PAI)	33
3.12 Polyethersulphony (PES), (PESU)	34
3.13 Polybenzimidazole (PBI)	36
3.14 Elektrisch leitfähige (konjugierte) Polymere	37
<b>4 Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe</b>	<b>41</b>
<i>Luboš Běhálék</i>	
4.1 Polymere auf Stärkebasis	43
4.2 Polyhydroxyalkanoate (PHA)	45
4.3 Polymilchsäure (PLA)	45
4.4 Polyglykolsäure (PGA)	46
4.5 Synthetische oxo-Bioabbaubare Polymere	47
4.6 Polyvinylalkohol (PVA)	48
4.7 Polylaprolakton (PCL)	48
<b>5 Spritzgießverfahren</b>	<b>50</b>
<i>Jiří Habr</i>	
5.1 Grundlagen des Spritzgießens	52

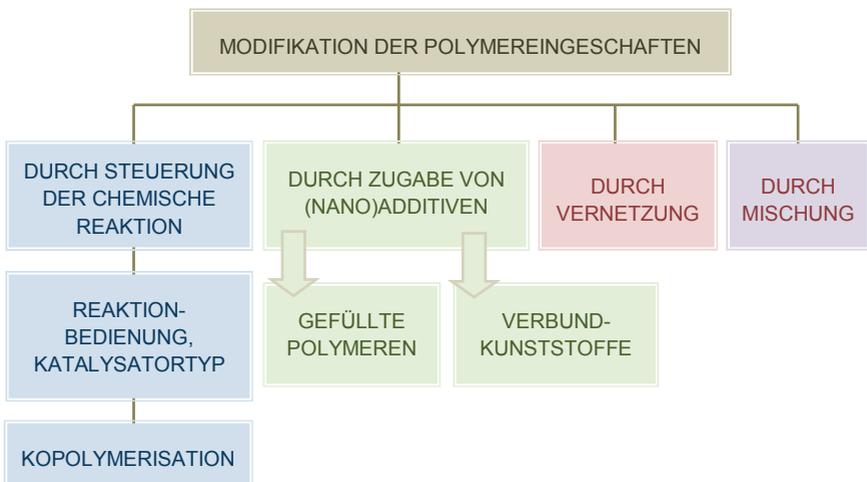
5.2	Spritzgießmaschine	53
5.2.1	Spritzeinheit	54
5.2.2	Schließereinheit	66
5.3	Herstellung eines Spritzgussteiles	69
5.4	Spritzgießparameter und ihr Einfluss auf die Qualität der Teile	73
5.4.1	Einspritzung und der Druck im Werkzeughohlraum	77
5.4.2	Einspritzdruck, Nachdruck, Einspritzzeit und Nachdruckzeit	79
5.4.3	Plastifizierung des Materials	81
5.4.4	Der Umschaltpunkt	86
5.4.5	Der Nachdruck	88
5.4.6	Die Werkzeugtemperatur	89
5.4.7	Kühlungszeit	93
<b>6</b>	<b>Sonderverfahren des Spritzgießens</b>	<b>94</b>
	<i>Jiří Habr</i>	
6.1	Thermoplast-Schaumspritzgießen (Leichtbauwerkstoffe)	94
6.1.1	Spritzgießen mit chemischen Treibmitteln	94
6.1.2	Spritzgießen mit physikalischen Treibmitteln	97
6.2	Innendruck-Spritzgießen (Fluidinjektionstechnik)	101
6.2.1	Gasinnendrucktechnik	101
6.2.2	Wasserinnendrucktechnik	104
6.3	Mikrospritzgießen	105
6.4	Mehrkomponentenspritzgießen	108
6.5	Sandwich-Spritzgießverfahren	114
6.6	Hybridspritzguss – Überspritzen	116
6.7	Spritzgießen mit Hochglanz	119
6.8	Spritzgießen von hochfesten Bauteilen	121
6.9	Spritzgießen von Pulverwerkstoffen	124
6.10	Spritzgießen von flüssigen Werkstoffen	127
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>130</b>

**Polymermaterialien** bzw. *Kunststoffe* und ihre *Komposite* erfüllen die Anforderungen für den modernen Maschinenbau. Dank ihrer Eigenschaften ersetzen sie in vielen Fällen metallische Werkstoffe. Neben gewöhnlichen Kunststoffen finden spezielle *Hochleistungskunststoffe* noch größere praktische Anwendungen. Sie werden beispielsweise für die Realisierung anspruchsvoller technischer Applikationen eingesetzt. Ihre Schlüsselmerkmale sind ausgezeichnete Wärmeformbeständigkeit ( $> 250\text{ °C}$ ), chemische Beständigkeit, lange Lebensdauer, beziehungsweise biologische Toleranz. Mit der Wärmeformbeständigkeit des Polymers sind auch seine mechanischen Eigenschaften verbunden. Einige Beispiele für Hochleistungspolymere sind *Polysulfone* (PSU), *Polyphenylensulfide* (PPS), *Polyetheretherketone* (PEEK), *Polyimide* (PI), *Polybenzimidazole* (PBI), *Flüssigkristalline Polymere* (LCP) usw. Zu diesen Materialien gehören keine Duroplaste, deren Wärmeformbeständigkeit bis  $150\text{ °C}$  begrenzt ist. Die genannten Kunststoffe werden in Kapitel 3 detaillierter beschrieben. In der Praxis werden immer mehr verschiedene Sorten von Polymergemischen eingesetzt, um gegenwärtigen Maschinenbauanforderungen gerecht zu werden. Für die Gemische werden Additive und Füllstoffe verwendet, um beispielsweise elektrisch leitfähige Polymere, Zyklopolymere mit hoher Glasübergangstemperatur, biologisch abbaubare Kunststoffe oder Polymere mit Formspeicher herzustellen. Bevor die modernen Hochleistungspolymere betrachtet werden, soll auf die Eigenschaften üblicher (Standard)- und technischer Polymere eingegangen werden. Informationen dazu sind in der Fachliteratur einfach zu erlangen.

Die **Standardkunststoffe** werden in die vier Gruppen: *Polyethylene* (PE-HD, PE-MD, PE-LD, PE-LLD), *Polypropylen* (PP), *Polyvinylchlorid* (PVC) und *Polystyrole* (PS, PS-E) eingeteilt. Nach den Angaben des deutschen Verbandes der Kunststoffherzeuger „PlasticsEurope“ repräsentieren diese vier Gruppen 66 % des Produktionsvolumens in Europa. Dies entspricht 50 Millionen Tonnen (weltweit 335 Millionen Tonnen). **Technische Kunststoffe** sind Materialien, die ausgezeichnete mechanische Eigenschaften und eine thermische Beständigkeit von über  $150\text{ °C}$  besitzen. Gegenüber von Standardkunststoffen sind sie preisintensiver.

Der Preis des Homopolymers PP in Mitteleuropa betrug im Jahr 2018 durchschnittlich 1,34 €/kg, wohingegen der Preis für farbloses Polyamid 6.6 (PA 6.6) zirka 2,88 €/kg und für Polycarbonat (PC) zirka 3,17 €/kg ausmachte. Zu technischen Kunststoffen gehören sowohl Duroplaste als auch Thermoplaste. Zu nennen sind *Polyamide* (PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12 usw.), *Polymethylmethacrylat* (PMMA), *Polyester* (PET, PBT), *Polycarbonat* (PC), *Styrol-Copolymere* (ABS, SAN, ASA) usw. Typische physikalische Eigenschaften von Standard- und Technischen Kunststoffen sind in der Tabelle 1.1 angeführt.

Die Eigenschaften von Polymeren lassen sich je nach Anforderung anpassen (siehe Abb 1.1). Dies ist u. a. durch gesteuerte chemische Reaktion möglich. Bei der Herstellung können geeignete Katalysatoren eine Veränderung der Molekularstruktur bewirken (siehe Beispiel: Metallocen-Polymere Kap. 1.1). Weiterhin lassen sich die Eigenschaften neuer Materialien auf Basis von Copolymeren durch die Zugabe von speziellen Additiven (auch Nano-Füllstoffe), durch die zusätzliche Vernetzung von linearen und weitverzweigten Polymeren (siehe Kap. 1.2), durch das Mischen bestehender Polymere (siehe Kap. 2), durch die Erzeugung von Verbundwerkstoffen beeinflussen. Das ermöglicht die Produktion von leichten, stabilen Bauteilen. Durch die Entwicklung dieser neuen Hochleistungskunststoffe (siehe Kap.3) können anspruchsvolle technische Applikationen ermöglicht werden.



**Abb. 1.1** Modifikationsmöglichkeiten der Polymereigenschaften in technischer Praxis



Tab. 1.1a Typische Eigenschaften von Standard- und Technischen Kunststoffen

Typ	Polymer	w (24 Std.) [%]	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>m</sub> [°C]	T <sub>b,max</sub> [°C]		ρ [g/cm <sup>3</sup> ]	E <sub>i</sub> [MPa]	σ <sub>m</sub> [MPa]	ε <sub>ib</sub> [%]
					Kurzfristig	Langfristig				
<b>Standardkunststoffe – Thermoplaste</b>										
K	PE-LD	< 0,01	-120	105 - 115	80-90	60 - 75	0,914 - 0,928	200 - 500	8 - 23	300 - 1 000
	PE-HD	< 0,01	-120	130 - 135	90-120	70 - 80	0,940 - 0,960	700 - 1400	18 - 35	100 - 1 000
	PP <sup>1</sup>	0,01 - 0,03	-15	160 - 174	140	100	0,900 - 0,907	1 100 - 1 300	21 - 37	20 - 800
A	PVC-U	0,04 - 0,40	60 - 100	-	75-100	65 - 85	1,380 - 1,550	1 000 - 3 500	50 - 75	10 - 50
	PVC-P	0,15 - 0,75	-50 - -5	-	55-65	50 - 55	1,160 - 1,350	1 - 1 000	10 - 25	170 - 400
	PS	0,03 - 0,10	95	-	60-80	50 - 70	1,050	3 200 - 3 250	45 - 65	3 - 4
<b>Technische Kunststoffe – Thermoplaste</b>										
K	PE-UHMW	< 0,01	-120	130 - 135	90 - 120	80	0,955 - 0,960	550 - 800	17 - 35	50 - 300
	POM	0,22 - 0,25	-50	165 - 185	110 - 140	90 - 110	1,410 - 1,420	2 800 - 3 200	62 - 70	25 - 70
	PEI <sup>1</sup>	0,30	75	250 - 260	200	100	1,370	3 100	47	50 - 300
	PBT	0,08	70	225 - 230	165	100	1,310	2 000	40	15
	PTFE	< 0,01	125 - 130	327 - 345	300	260	2,130 - 2,200	410 - 800	25 - 36	300 - 550
	ETFE	0,01 - 0,03	-	255 - 280	220	150	1,700	800 - 1 100	35 - 54	100 - 350
	PA 6	1,30 - 1,90	50	215 - 225	140 - 180	80 - 100	1,130	1 400	70 - 85	200 - 300
	PA 6.6	1,20 - 1,50	50	250 - 260	170 - 200	80 - 120	1,140	2 000	77 - 84	150 - 300
	PA 11	0,30	45	188 - 194	140 - 150	70 - 80	1,040	1 000	56	500
	PA 12	0,25	45	175 - 180	140 - 150	70 - 80	1,020	1 600	56 - 65	300
A	SAN	0,20 - 0,30	105	-	95	85	1,080	3 600	75	5
	ABS	0,20 - 0,45	105	-	85 - 100	75 - 85	1,040 - 1,060	1 900 - 2 700	32 - 45	15 - 30
	ASA	0,10 - 0,40	110	-	85 - 90	70 - 75	1,040	1 800	32	40
	PMMA	0,10 - 0,40	110	-	85 - 100	65 - 90	1,170 - 1,200	2 700 - 3 200	50 - 77	2 - 10
PC	0,16	140 - 150	-	160	135	1,200	2 100 - 2 400	56 - 67	100 - 130	
<b>Technische Kunststoffe – Duroplaste</b>										
A	PF	0,30 - 1,20	> 150	-	140	110	1,400	5 600 - 12 000	25	0,4 - 0,8
	UF	0,40 - 0,80	> 150	-	100	70	1,500	7 000 - 10 500	30	0,5 - 1,0
	MF	0,10 - 0,60	> 60	-	120	80	1,500	4 900 - 9 100	30	0,6 - 0,9
A	UP	0,03 - 0,50	> 60	-	200	150	2,000	14 000 - 20 000	30	0,6 - 1,2
	EP	0,05 - 0,20	> 75	-	180	130	1,900	21 500	30 - 40	4

A – amorphes Polymer; K – semikristallines Polymer; w – Wasseraufnahme während 24 Stunden; T<sub>b,max</sub> – Max. Betriebstemperatur; T<sub>g</sub> – Glasübergangstemperatur; T<sub>m</sub> – Schmelztemperatur; ρ – Dichte; E<sub>i</sub> – Elastizitätsmodul; σ<sub>m</sub> – Zugfestigkeit; ε<sub>ib</sub> – Nominelle Bruchdehnung; 1 – kommerzieller Typ mit dem Grad der Isotaktizität 90 - 95 %

**Tab. 1.1b** Typische Eigenschaften von Standard- und Technischen Kunststoffen

Polymer (Synthesetyp)	$a_{c,u}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$a_{c,A}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Schwindung [%]	LOI [%]	Preis <sup>4</sup> [€/Kg]	Hauptanwendungsgebiet
<b>Standardkunststoffe – Thermoplaste</b>						
Pm PE-LD	N	N	1,0 - 3,0	17 - 19	1,27 <sup>1</sup>	Folien und Platten (55%), Haushaltswaren und Spielzeuge (16%)
Pm PE-HD	N	N	1,5 - 3,0	17 - 19	1,30 <sup>1</sup>	Flaschen (40%), Haushaltswaren (35%) Rohrleitung (10%)
Pm PP <sup>1</sup>	N	3 - 17	1,3 - 2,5	17 - 18	1,34 <sup>2</sup>	Fasern (30%), Haushalt (15%), Automotiv (15%)
Pm PVC-U	N	20 - 50	0,4 - 0,8	40 - 45		Rohrleitung (35%), Folien, Platten (15%), Fußbodenbeläge (10%), Isolierung von Drähten und Kabeln (5%), Automotiv (5%)
Pm PVC-P	N	N	0,7 - 3,0	20 - 40		Verpackungen, Kontainer (35%), Haushalt, Spielzeug (25%)
Pm PS	5 - 20	2 - 2,5	0,4 - 0,7	17 - 18	1,47	
<b>Technische Kunststoffe – Thermoplaste</b>						
Pm PE-UHMW	N		4,0	17 - 18		Konstruktionsteile mit guten Gleiteigenschaften
Pm POM	100	8	1,5 - 2,5	18	1,84	Zahnräder, Lager, Schrauben, Gerätegehäuse
Pk PET	N	4	1,6 - 2,0 (0,2 <sup>2</sup> )	23 - 25		Textil (61%), Haushalt (18%), Reifen (10%)
Pk PBT	N	4	1,0 - 2,2	20 - 24		Maschinenteile, Elektrotechnik, kleine Geräte
Pm PTFE	N	13 - 15	0,01 - 0,06	95 - 96		Beschichtungen für Chemieindustrieanlagen, Kabelisierungen, Elektrotechnik, Oberflächenbeschichtung von Geschirr
Pk PA 6	N	N	0,8 - 2,5	23 - 26	2,67	Maschinenanlagen, Automotiv, Haushalt, Textil, Reifenprofile, Gesundheitswesen
Pa PA 6.6	N	15 - 20	0,8 - 2,5	21 - 27	2,88	
Pk PA 11	N	30 - 40	1,0 - 2,0	21 - 26		Automotiv (Bowdenzüge, Brennstoffleitungen, Schnellkupplungen), Verpackungen, Kabelextrusionen, Gesundheitswesen (Katheter, Transfusionsbehältnisse)
Pk PA 12	N	10 - 20	1,0 - 2,0	21 - 26		
Pm SAN	8 - 20	2 - 3	0,4 - 0,6	18 - 20	2,13	Haushaltsgeräte, Elektrotechnik, Automotiv
Pm ABS	70 - N	7 - 20	0,4 - 0,7	19	2,04	Rohrleitungen (30%), Automotiv (15%), Kopierer und Drucker
Pm ASA	N	18	0,4 - 0,7	19		Außenteile von Fahrzeugen, Außenapplikationen, elektrische Werkzeuge
Pm PMMA	18	2	0,3 - 0,8	19 - 20	3,09	Schütze von Geräten und Lichtquellen, transparente Scheiben, Bauwesen
Pk PC	N	20 - 30	0,6 - 0,7	30 - 34	3,17	Scheiben (37%), Elektronik (15%), Geräte (15%)
<b>Technische Kunststoffe – Duroplaste</b>						
Pk PF	> 6	> 1,5	0,2 - 0,8	-		Klebstoffe (34%), Gewebefestmittel (19%), Presslinge (8%)
Pk UF	> 6,5	> 2,5	0,5 - 0,8	-		Platten, Papier und Gewebefestmittel (70%), Presslinge (9%)
Pk MF	> 7,0	> 1,5	0,8 - 1,0	-		Geschirr, Tischplatten, Bindemittel, Beschichtungen
Pk UP	> 4,5	> 3,0	0,4 - 0,7	-		Bekleidung, Schmutz, Klebstoffe, Anstrichstoffe, Bindemittel
Pk EP	> 8	> 3,0	0,4 - 0,8	-		Beschichtung (44%), Komposite (18%), Fußbodenbeläge (6%)

Pm – Polymerisation; Pk – Polykondensation; Pa – Polyaddition; a<sub>c,u</sub> – Schlagzähigkeit Charpy; a<sub>c,A</sub> – Kerbschlagzähigkeit Charpy; LOI – Sauerstoffindex; 1 – Spritzgießtyp; 2 – Homopolymer; 3 – amorpher Zustand; 4 – Durchschnittlicher Preis im Mitteleuropa (November 2018)

**Metallocenkatalysatoren** enthalten nur ein aktives Zentrum, welches eine enge Distribution bezüglich des Molekulargewichtes der Polymere bewirkt. Im Gegensatz dazu stehen Ziegler-Natta-Katalysatoren, die mehrere Typen von aktiven Zentren mit verschiedener Aktivität und Selektivität enthalten (z.B. auf Basis von Cr/SiO<sub>2</sub>- oder Ti/MgCl<sub>2</sub>-Verbindungen). Mittels des Metallocen-Katalysators lassen sich die Eigenschaften des Polymers, wie z. B. dessen Mikrostruktur (Taktizität), das Molekulargewicht und die Polydispersität beeinflussen. Weiterhin ist es möglich, die Copolymerisation einzelner Comonomere oder ihre Distribution in der Polymerkette zu variieren.

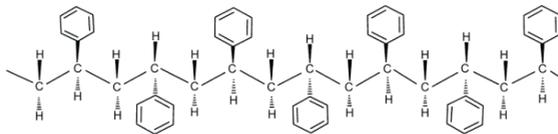


**Taktizität** – Anordnung der stereoisomeren Zentren in der Hauptkette des Polymers (z. B. Methylgruppen -CH<sub>3</sub> des Polypropylen oder Phenylgruppen C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>- des Polystyrols)

**Polydispersität** – verschiedene Makromolekülgrößen im Polymer

Ein Meilenstein der Metallocen Katalyse ist die Möglichkeit, die Anordnung der Monomere im Polymer zu beeinflussen. So wurde die Herstellung von *linearem Polyethylen niederer Dichte* (PE-LLD), *isotaktischem und syndiotaktischem Polypropylen* (iPP, sPP) und *syndiotaktischem Polystyrol* (sPS) ermöglicht. Letzteres unterscheidet sich vom standard-amorphen (ataktischen) Polystyrol (PS-GP), durch die regelmäßige Anordnung der Phenylringe zu beiden Seiten der Hauptpolymerkette (siehe Abb. 1.2). Diese regelmäßige Struktur ermöglicht die teilweise Kristallbildung, welche die Festigkeit, Steifheit, chemische und thermische Beständigkeit erhöht ( $T_m = 270\text{ °C}$ ,  $T_g = 100\text{ °C}$ , langfristige thermische Beständigkeit bis  $130\text{ °C}$ ). Im Vergleich mit Konkurrenz-Kunststoffen zeichnet sich die niedrige dielektrische Konstante aus (diese Konstante entspricht den der Fluorkunststoffen), die in einem breiten Temperatur- und Frequenzbereich praktisch konstant ist und eine große Beständigkeit gegen kriechende Ströme hat. Diese Eigenschaften sind auch in feuchter Umgebung stabil, was dieses Material für den Einsatz als Konstruktionsteil in der Automobilindustrie und für Isolationsmaterial in der Elektronik befähigt. Das erste entwickelte syndiotaktische Polystyrol erhielt die Geschäftsbezeichnung *Xarec*

(Idemitsu). Später wurde z. B. *Questra* (Dow Chemical) auf Markt gebracht und dazu auch eine Form mit Verstärkung durch Glasfasern (GF). Dank der Eigenschaften und des günstigen Preises macht es Konkurrenz zu PA 6.6, PBT, PET und weiteren. Metallocen Katalysatoren ermöglichen auch die Herstellung von fast durchsichtigem PP (z.B. *Metocene* der Firma Lyondell Basell). Dieses Material erreicht eine Durchsichtigkeit von 93 % bis 96 % (bezieht sich auf transparentes PET, das für die Herstellung von Getränkeflaschen genutzt wird). Im Fall von Polyethylen (PE) benutzt man Metallocen-Katalysatoren für die Synthese, welche eine enge Distribution des Molekulargewichtes bewirken (z.B. mLLDPE Geschäftsbezeichnung *Exceed* der Firma ExxonMobil). Das Material weist eine außerordentliche Festigkeit, Elastizität, Beständigkeit und Stabilität beim Einsatz in der Verpackungsindustrie auf.



**Abb. 1.2** Struktur des syndiotaktischen Polystyrols (sPS)

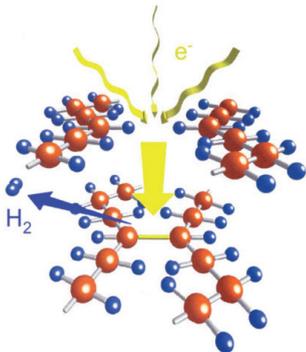
## 1.2

## Zuzügliche Vernetzung von Polymeren

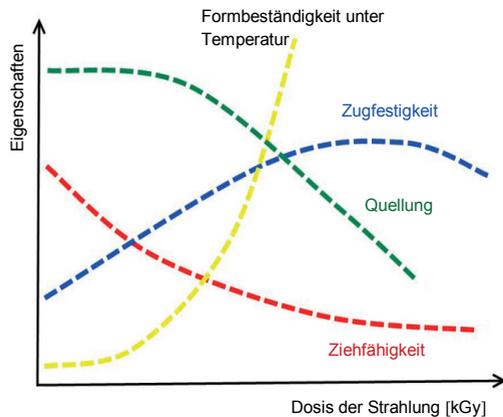
**Die Vernetzung der Polymere** ist ein Verfahren, bei dem mit Hilfe von Vernetzungsmitteln chemische Querverbindungen zwischen linear- oder weitverzweigten Makromolekülen geschaffen werden und ein Raumnetz gebildet wird. In der Hinsicht auf die große Länge der Makromoleküle reicht die Zugabe einer sehr geringen Menge des Vernetzungsmittels, um das Molekulargewicht unendlich zu vergrößern. Durch die Vernetzung der Polymere verringert sich die Löslichkeit, Schmelzbarkeit und Thermoplastizität. Umgekehrt verbessert sich die Formbeständigkeit und man erhält ausgezeichnete mechanische Eigenschaften auf dem Niveau spezieller technischer Kunststoffe. Die Moleküle des Vernetzungsmittels können ein Bestandteil der Querverbindungen sein, müssen es aber nicht. In diesem Fall schafft das Vernetzungsmittel nur reaktive Plätze für neue Bindungen. Die erste Variante tritt z. B. bei der Vernetzung von Kautschuk durch Schwefel oder bei der Vernetzung von Polyethylen durch Silan auf. Die zweite Variante tritt bei der

Vernetzung von Thermoplasten durch Peroxide (unter erhöhter Temperatur spaltet sich das Peroxid verteilt in freie Radikale) oder bei der Einwirkung von Strahlung (UV-, Elektronen-,  $\beta$ -, elektromagnetische- oder  $\gamma$ -Strahlung) ein.

Bei der Einwirkung von UV-Strahlen richten sich die Vernetzungsniveaus durch Zugabe fotoaktiver Dotierstoffe aus (auf der Basis der Mono- und Dicarboxylverbindungen), die freie Radikale (vorwiegend in amorphen Gebiete) und folgende vernetzte Struktur bilden. Primäre Interaktion der Strahlung mit dem Polymer schafft freie Radikale. Darauf folgt die sekundäre Reaktion, welche die Abstraktion von Wasserstoffatomen, die Bildung der Doppelbindungen, die Vernetzung, sowie die Spaltung der Ketten beinhaltet. Die Voraussetzung ist, dass die Vernetzung überwiegt.



**Abb. 1.3:** Prinzip von Radiazionsvernetzung



**Abb. 1.4:** Kunststoffeigenschaften in der Abhängigkeit der Strahlungsdosis

Bei der Strahlenvernetzung durch  $\beta$ -Strahlen ist das Polymer dem Strom von emittierenden Elektronen ausgesetzt. Die Strahlung bewirkt die Aktivierung und Ionisierung von den Molekülen im bestrahlten Material. Durch die durchdringenden  $\gamma$ -Strahlen (Photonenstrahlen) entstehen bei der Interaktion mit der Umgebung die sekundären (exzitierenden) Elektronen, die die Moleküle des bestrahlten Polymers aktivieren und ionisieren. Tritt der Zerfall von C-H-Bindungen ein, entstehen Radikale, die miteinander reagieren und die erwartete Vernetzungsstruktur bilden. Bei der Reaktion von freien Radikalen benachbarter Ketten entstehen neue

C-C-Bindungen (siehe Abb. 1.3).  $\gamma$ -Strahlung hat gegenüber der  $\beta$ -Strahlung eine höhere Eindringfähigkeit bei relativ niedriger Intensität der Dosis der Bestrahlung. Die Anwesenheit von drei und mehr Monomeren ist Voraussetzung dieses Verfahren. Bei einigen Polymeren ist ein Vernetzungsmittel notwendig. Die Vernetzung durch Ionisationsstrahlung modifiziert die Eigenschaften von Standard- und Technischen Kunststoffen und verleiht ihnen die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Hochleistungskunststoffen (siehe Abb. 1.4). Die Vernetzung findet bei Standardtemperatur und –druck statt. Meist benötigt dies keine Zugabe weiterer Zusätze.

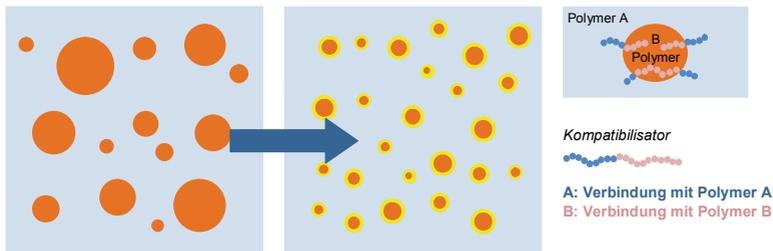
Die Wirksamkeit der Strahlenvernetzung ist beeinflusst durch die Kristallinität, die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) und die chemische Struktur des Polymers, die den Ertrag an Polymer-Radikalen beeinflusst. Da die Vernetzung hauptsächlich in amorphen Gebieten des Polymers stattfindet, verbessert sich die Vernetzung mit sinkendem Kristallisationsgrad des Polymers. Folglich vernetzen sich flexible Ketten mit genügend interner Beweglichkeit leichter. Wird das Polymer über die Glasübergangstemperatur erwärmt, gelangt es von der amorphen Phase in den Kautschukzustand. In dem es sich aufgrund der internen Rotation von Segmenten der Makromoleküle ausdehnt und so bei Einwirkung von Strahlung einfacher die Bildung der Querverbindungen eingeht. Der Ertrag an freien Radikalen, welche durch die Spaltung der seitlichen Ketten entstehen, hängt von der Festigkeit der Bindung ab. Je schwächer die Bindung ist, desto größer ist der Ertrag. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Atmosphäre während der Bestrahlung. Wenn das Polymer an der Luft bestrahlt wird, könnte dies, aufgrund des Sauerstoffs und der Feuchtigkeit, zur Oxidation des Polymers führen. Die oxidative Degradation steht der Vernetzung entgegen. Darum ist es in einigen Fällen notwendig unter Sauerstoffausschluss zu arbeiten (Vakuum oder trockenes Inertgas benutzt man z. B. bei der Vernetzung von Polytetrafluorethylen - PTFE).

**Polymerblends** bilden einen wesentlichen und ständig wachsenden Teil der Polymermaterialien und stellen eine Möglichkeit dar, ein Material mit unikaleneigenschaften nach Maß für konkrete Applikationen bei der Beibehaltung des optimalen Verhältnisses zwischen Materialpreis und Materialeigenschaften anzufertigen. Die Herstellung einer neuen Polymermischung ist wesentlich preiswerter und nicht so technologisch anspruchsvoll als die Entwicklung und Herstellung eines neuen Polymers.

Als Grundlage für Polymermischungen dient die einfache Materialmischung. Zwischen den Bestandteilen der Mischung existiert jedoch meistens eine große Zwischenphasenspannung. Es handelt sich um heterogene Mischungen, die gegenüber homogenen Mischungen nicht mischbar sind. Die Zwischenphasenspannung kann man mit einem geeigneten *Kompatibilisator* senken. Es handelt sich dabei um Stoffe, die die Phasenstruktur verfeinern, die Zwischenphasenadhäsion der Polymermischungen erhöhen und so eine bessere Homogenität erzielen (siehe Abb. 2.1). Die **Kompatibilisatoren** sind allgemein makromolekulare Stoffe deren Ketten gewöhnlich eine voluminöse Struktur aufweisen, wobei ein Teil mit dem erstem Teil der Bestandteile und der zweite Teil mit dem zweiten Teil der Bestandteile von der Polymermischung mischbar ist (siehe Abb. 2.1). Diese so genannte Blockstruktur kann *in-situ* während des Mischprozesses gebildet oder vorbereitet in eine unmischbare Mischung zugegeben werden.

Der erste Fall ist ein Beispiel **chemischer Kompatibilisation**. Im zweiten Fall handelt es sich um **physikalische (additive) Kompatibilisation**. Chemische Kompatibilisatoren funktionieren auf der Basis chemischer Reaktionen. Die Polymermischung PET/PA ist ein Beispiel dafür. Es läuft die chemische Reaktion zwischen den Ester-Enden des PET und den Amid-Enden des PA ab. Zu physikalischen Kompatibilisatoren gehören Block- oder veredelte Copolymere (Polymer ist mit einem bestimmten Monomer veredelt), welche die Blöcke mit den Bestandteilen der Mischung mischbar halten. Dafür ist die Polymermischung PP/PA ein Beispiel. PP wird erst mit einem Monomer veredelt (grafitiert), zum Beispiel mit

dem Maleinsäureanhydrid, oder Itaktionsäureanhydrid (PP-g-MA, bzw. PP-g-IA) und danach läuft die Reaktion mit PA ab. Gegenwärtig entwickelte Kompatibilisatoren ermöglichen es Mischungen aus nicht mischbaren Polymeren, wie z. B. polaren und unpolaren, kristallinen und amorphen Polymeren, herzustellen. Die großen zwischenmolekularen Kräfte in kristallinen Gebieten sichern in semikristallinen Polymeren zum Beispiel ein hohes Elastizitätsmodul oder eine gute chemische Beständigkeit, während das amorphe Polymer die Eigenschaft der hohen Schlagzähigkeit beiträgt.



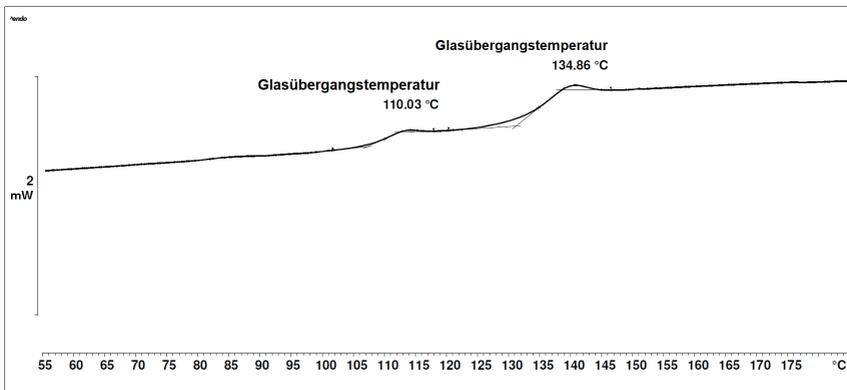
**Abb. 2.1** Wirkung von Kompatibilisatoren in Polymermischungen

Polymermischungen kann man nach der Mischbarkeit in drei Kategorien einteilen:

- **Mischungen von vollständig mischbaren Polymeren** mit homogener einphasiger Struktur, die die Minderheit ist. Ein bekanntes Beispiel ist die Mischung PS/PPO, die in einem breiten Thermobereich mischbar ist. Dieser Typ der Mischung weist nur eine Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) auf, die zwischen den Glasübergangstemperaturen der einzelnen Bestandteile liegt.
- **Mischungen von teilweise mischbaren Polymeren**, bei dem sich nur ein kleiner Teil eines Bestandteils der Mischung im zweiten Teil löst. (z.B. PC/ABS). Dieser Typ der Mischung weist die Morphologie zweier Phasen und deren bestehende Eigenschaften auf, und wird als *kompatibel* bezeichnet. Beide Phasen der Mischung haben eigene  $T_g$ , die nahe am Wert des Hauptbestandteils der Phase liegen, aber zum Wert  $T_g$  des zweiten Bestandteils hin verschoben sind, siehe Abb. 2.2.
- **Mischungen von nicht mischbaren Polymeren** (heterogene Mischung) haben eine scharfe Grenze zwischen den Phasen und eine schlechte Adhäsion zwischen beiden Bestandteilen ( $T_g$  entspricht jeweils den sauberen Bestandteilen der Mischung). Beispiele dafür sind die Mischungen PP/EPDM, PS/PP, PA/ABS, PA/PP,

PA/EPDM, PA/PPO, usw. All diese Mischungen wurden erst nach gelungener Kompatibilisation kommerziell erfolgreich.

Die Übersicht der kommerziell bedeutenden Polymermischungen ist in Tabelle 2.1. dargestellt.



**Abb. 2.2** DSC-Thermogrammaufzeichnung in der Aufheizphase der PC / ABS-Polymermischung (10 °C /min)

Tab. 2.1a Kommerziell bedeutende Polymermischungen

Mischung	Charakteristik	Anwendungsbeispiele
<b>Die PP Mischungen</b> – mit dem Zweck der Erhöhung der Schlagzähigkeit von PP unter niedrigen Temperaturen		
<b>PP/EPDM</b>	Polypropylen (PP), das eine hohe Glasübergangstemperatur von $-15\text{ °C}$ besitzt, wird im Reaktorverfahren mit dem Ethylen-Propylen Elastomer (EPDM) modifiziert, mit dem Zweck der Senkung der Temperatur $T_g$ und damit der Erhöhung der Schlagzähigkeit unter niedrigen Temperaturen bei Beibehaltung genügender Festigkeit und Steifheit des Materials ( $T_g$ für EPDM ist zirka $-60\text{ °C}$ ).	
<b>PP/PE</b>	Polyethylen (PE) benutzt man ähnlich wie Elastomer für die Verbesserung der Schlagzähigkeit von Polypropylen (PP) unter niedrigen Temperaturen (PE hat deutlich niedrigere Temperaturen des Glasübergangs als PP; bis $-120\text{ °C}$ ). Es handelt sich vorwiegend um Mischungen aus PP mit PE-LD oder PE-LLD.	
<b>PP/POM</b>	Diese Mischung kombiniert die gute Schlagzähigkeit von Polypropylen (PP) mit der Festigkeit und den Eigenschaften des Polyoxymethylen (POM). Beide Bestandteile des Materials ähneln sich bezüglich Viskosität und Schmelztemperatur (siehe Tab. 1.1).	
<b>Die PE Mischungen</b> – Ziel: die Erhöhung der PE-Eigenschaften		
<b>PE/PC</b>	Polyethylen (PE) ist mit zirka 5 Massen-% an Polycarbonat (PC), welches ein hohes Elastizitätsmodul aufweist, gemischt. Im Vergleich mit PE weist die Polymermischung eine größere Steifigkeit, aber auch eine größere Beständigkeit gegen die Wärmedegradierung auf.	
<b>Die PS Mischungen</b> – Ziel: die Modifikation der PS-Eigenschaften		
<b>PS/PP</b>	Diese Mischung ist hauptsächlich zur Herstellung von Teilen bestimmt, die eine hohe Anforderung an die Widerstandsfähigkeit gegen Kratzer stellen, sowie eine einheitliche matte Oberfläche und angenehme Haptik. Aus dem ökonomischen Gesichtspunkt ist es günstiger lackierte Teile aus ABS durch unlackierte Teile der Mischung PS/PP zu ersetzen, da die Lackierung entfällt.	
<b>PS/PPO</b>	Die Mischung kombiniert die Hitzebeständigkeit und die Zähigkeit von Polyphenyloxid (PPO) mit der guten Verarbeitbarkeit und den niedrigen Kosten von Polystyrol (PS). PS verbessert die Verarbeitbarkeit von PPO. In Kombination mit Füllungen benutzt man es in der Konstruktion von Büroausstattungen.	

Tab. 2.1b Kommerziell bedeutende Polymermischungen

Mischung	Charakteristik	Anwendungsbeispiele
<p><b>PC/ABS</b></p>	<p>Die Mischung kombiniert die sehr gute Verarbeitbarkeit, sowie Beständigkeit gegen Korrosion unter Spannung des Acrylnitril-Butadien-Styrols (ABS) mit den ausgezeichneten Eigenschaften, wie der Hitze- und Schlagbeständigkeit des PCs. Die Ausgewogenheit der Mischungseigenschaften kontrolliert man über das Verhältnis von PC zu ABS, im Besonderen über das Molekulargewicht vom PC und entsprechenden Additiven. Die Mischung weist einen synergischen Effekt auf, der die ausgezeichnete Schlagzähigkeit unter niedrigen Temperaturen bewirkt. Diese ist besser als die Schlagzähigkeit der Einzelkomponenten ABS und PC. Die Mischung weist auch eine hohe Korrosionsbeständigkeit unter Spannung auf, die in reinem PC zu niedrig ist.</p>	
<p><b>PC/ASA</b></p>	<p>Die Eigenschaften dieser Mischung sind ähnlich der Mischung PC/ABS. Dank des Acrylnitril-Styrol-Acrylates (ASA) zeichnet sie sich durch eine bessere Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse und UV-Strahlen aus, was sie für Außenanwendungen nutzbar macht. Die größere Wärmebeständigkeit verringert bei der Verarbeitung das Risiko der Degradation und die Neigung zum Vergilben des Materials.</p>	
<p><b>PC/PMMA</b></p>	<p>Die Mischung hat dank der Anwesenheit vom Polymethylmethacrylat (PMMA) ausgezeichnete Witterungs- und UV-Strahlenbeständigkeit, weist aber eine verringerte Schlagzähigkeit und chemische Beständigkeit auf. In der praktischen Anwendung enthalten die Mischungen meistens 30 % PMMA. Die Eigenschaften sind ähnlich der Mischung PC/ASA, jedoch mit dem Unterschied, dass die Kriecheigenschaften und Korrosionsbeständigkeit unter Spannung schlechter sind.</p>	

Tab. 2.1c Kommerziell bedeutende Polymermischungen

Mischung	Charakteristik	Anwendungsbeispiele
<p><b>PC/PBT (PET)</b></p>	<p>Die Mischung verbindet die Vorteile von Polycarbonat (30 - 70 % PC) mit den der Polyester (20 - 60 % PBT oder PET) und zeichnet sich durch eine große Schlagzähigkeit unter niedrigen Temperaturen aus (ausgezeichnete Absorption von Energie bei der Deformation des Teiles). Außerdem weist es eine gute Beständigkeit gegen Materialermüdung, Chemikalien, Brennstoffe, und Öle, sowie gute Elektroigenschaften auf. In Hinsicht auf die niedrigere Hygroskopizität des Materials, haben die Teile eine ausgezeichnete Formstabilität.</p>	
<p><b>Die PA Mischungen</b></p>	<p>– mit dem Zweck der Erhöhung der Zähigkeit, Senkung der Kratzempfindlichkeit, der Glasübergangstemperatur und der Hygroskopizität des Polyamids (PA)</p>	
<p><b>PA/ABS</b></p>	<p>Polyamid bringt eine ausgezeichnete Wärme- und Chemikalienbeständigkeit, gute Zugeigenschaften, gute Viskosität und ausgezeichnete Lackierbarkeit ein. Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) senkt die Kontraktion und die Hygroskopizität der Mischung, verbessert die Maßstabilität, erhöht die Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen und die Korrosionsbeständigkeit unter Spannung. Die Wärmebeständigkeit ist vergleichbar mit der des Polycarbonats (PC).</p>	
<p><b>PA/ASA</b></p>	<p>Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA) liefert der Polymermischung eine höhere Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse und UV-Strahlen, sichert gleichzeitig die Schlagzähigkeit, Farbbeständigkeit und das Aussehen einer matten Oberfläche.</p>	
<p><b>PA/EPDM</b></p>	<p>Es handelt sich um eine Mischung auf der Basis des PA mit einer erhöhten Zähigkeit, die für das Ethylen-Propylen Elastomer (EPDM) typisch ist, wobei PA die hohe Wärme- und Formbeständigkeit bei Hochtemperatur, seine guten mechanischen Eigenschaften, sowie die Strahlenbeständigkeit einbringt. Kommerziell ausgenutzte Mischungen von PA/EPDM enthalten gewöhnlich 10 - 25 % des Elastomers.</p>	

Tab. 2.1d Kommerziell bedeutende Polymermischungen

Anwendungsbeispiele	
Mischung	Charakteristika
<b>PA/PP (PE)</b>	Die Eigenschaften der Mischung ähneln den von Polyamiden (hohe Festigkeit und Steifigkeit). Dank der Modifikation mit Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE-HD, PE-LLD) hat es jedoch eine höhere Zähigkeit, niedrigere Hygroskopizität und einen geringeren Preis. Aufgrund der niedrigeren Hygroskopizität haben die Teile eine größere Maßhaltigkeit, höhere Steifigkeit, sowie bessere Abriebfestigkeit und dauerhafte mechanische Eigenschaften. Kommerzielle Mischungen erhalten meistens 30 % PE.
<b>PA 6 /PA 6.6</b>	Die Mischung kombiniert die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile: die ausgezeichnete Schlagzähigkeit, die Dampfeigenschaften, die bessere Verarbeitbarkeit, die niedrige Kontraktion und die bessere Oberflächenqualität des Polyamid 6 (PA 6), mit der niedrigen Wasserabsorption, der größeren Wärmebeständigkeit, der höheren Steifheit, der besseren Abriebbeständigkeit und der Beständigkeit gegen hydrolytische Polymerdestruktion des Polyamid 6.6 (PA 6.6). Die Mischung weist einen geringeren Grad an Kristallinität als reines PA 6 auf.
<b>PA 6 / aPA</b>	Die Kombination aus Polyamid 6 (PA 6) und amorphem Polyamid (aPA) benutzt man kommerziell für die Verbesserung der Durchsichtigkeit des Materiales und die Erhöhung der Beständigkeit gegen den Oxidation und UV-Strahlen.
<b>PA / PPO</b>	Die Mischung kombiniert die ausgezeichneten Strömungseigenschaften des Polyamides (PA), sowie seine gute Verarbeitbarkeit mit der geringen Feuchtigkeitsabsorption, Wärme- und Maßstabilität des Polyphenyloxids (PPO). Die Schlagzähigkeit dieser Mischung ist geringer als die der Mischung PC/PBT.
<b>Die POM Mischungen</b> – Ziel: Erhöhung der Zähigkeit, Senkung der Kratzempfindlichkeit, der Glasübergangstemperatur, sowie der Hygroskopizität des POM	
<b>POM/PTFE</b>	Die Polymermischung kombiniert die ausgezeichneten Eigenschaften von Polyoxymethylen (POM) und Polytetrafluorethylen (PTFE). POM ist ein hochkristallines Polymer mit entsprechend guten Eigenschaften: ausgezeichnete Steifigkeit, Beständigkeit gegen Ermüdungsbeanspruchung, Beständigkeit gegen Lösungsmittel, Kriechbeständigkeit und Beständigkeit gegen hohe Temperaturen. Obwohl sich POM durch einen hohen Reibungskoeffizienten auszeichnet, lässt sich dieser mit der Zugabe von PTFE senken, was die Beständigkeit der Mischung gegen Abnutzen erhöht.



Tab. 2.1e Kommerziell bedeutende Polymermischungen

Mischung	Charakteristik	Anwendungsbeispiele
<b>POM/EPDM (EVA)</b>	Polyoxymethylen (POM) hebt sich mit einer ausgezeichneten Festigkeit ab, jedoch begrenzt die schlechte Schlagzähigkeit seinen Einsatzbereich. Durch die Mischung mit Ethylen-propylen Elastomer (EPDM) oder mit Hilfe von Ethylenvinylacetat (EVA) unter Verwendung eines Kompatibilisators erhält das Material eine größere Zähigkeit ohne die typischen Eigenschaften des POM bedeutend zu beeinflussen.	
<b>Die Polyester-mischungen</b>		
<b>PET/PBT</b>	Die Mischung weist eine erhöhte Kristallinität auf, sowie einen besseren Glanz, größere Schlagfestigkeit als reines PET, welches nur langsam kristallisiert.	
<b>PET/PMMA</b>	Die Mischung weist eine niedrigere Deformation und Kontraktion als reines Polyethylenterephthalat (PET) und einen geringeren Preis als Polymethylmethacrylat (PMMA) auf. Anwendung findet das Material in der Elektronik und elektronischen Industrie.	
<b>PBT/ASA</b>	Mit der Zugabe von Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA) verbessert sich die Witterungs- und UV-Strahlenbeständigkeit des Polybutylenterephthalates (PBT).	
<b>PBT/PPO</b>	Die Mischung kombiniert vorteilhafte Eigenschaften beider Materialien, wie der hohen Festigkeit und der niedrigen Hygroskopizität. Es weist eine hohe Wärmebeständigkeit und Maßhaltigkeit wie der vom Hochleistungskunststoff PPE auf.	

**Hochleistungspolymere** sind die Gruppe der Materialien, die für anspruchsvolle Applikationen verwendet werden. Sie zeichnen sich nicht nur durch die Wärmebeständigkeit, mechanische Stabilität und chemische Beständigkeit, sondern auch durch ihre Funktionseigenschaften aus, die mit der Zugabe von speziellen Additiven erlangt werden (z.B. kontrastreiche Mittel, die den Werkstoff gegen Röntgenstrahlen undurchdringlich machen; Carbon-Nanoröhrchen mit graphitisierter Struktur der Oberfläche, die die Leitfähigkeit des Polymeres bei Beibehaltung der vorteilhaften Eigenschaften der Matrice erhöhen). Im folgenden Text ist die Übersicht einiger bedeutender Materialien dieses Gebietes aufgeführt, die auch Bezug auf die Struktur im amorphen oder semikristallinen Zustand nehmen. Den größten Anteil des Marktes bilden Fluorpolymere (45 %), danach kommen aromatische Polymere die Schwefel enthalten (hauptsächlich PPS bis 20 %), aromatische Polyarylether, Polyketone (10 %), besonders PEEK und Polymerflüssigkristalle LCP (6 %). Die größte industrielle Nutzung dieser Materialien geschieht in der Elektrotechnik (41 %)

## 3.1

## Fluorkunststoffe

*Fluorkunststoffe* sind **semikristalline Materialien**, die in den Makromolekülen Fluoratome enthalten. Man stellt eine ganze Reihe dieser Materialien her, jedoch nimmt das **Polytetrafluorethylen (PTFE)** den vorwiegenden Teil der Produktion ein. Es wird durch die Polymerisation aus gasförmigen *Tetrafluorethylen* hergestellt und zeichnet sich durch den **niedrigsten Reibungskoeffizienten** aller Polymere ( $\mu_s = 0,02$ ) und die größte chemische Beständigkeit aus. Weitere Fluorkunststoffe sind z. B. das *Ethylentetrafluorethylen (ETFE)*, *Polyvinylidenfluorid (PVDF)*, *Polychlorotrifluorethylen (PCTFE)*, *Tetrafluorethylenperfluoralkylvinyleter (PFA)*, *Tetrafluorethylenhexafluorpropylen (FEP)* und *Tetrafluorethylenperfluormethyl-vinylether (MFA)*.

Für alle Fluorkunststoffe ist eine gute **chemische Beständigkeit**, sowie **ausgezeichnete Wärmebelastung** (bis 290 °C), gute elektrisch isolierende Eigenschaften und **hohe Beständigkeit gegen den Brand** charakteristisch, (sind

selbstlöschend; besser als alle Polymere; LOI = bis 96 %). Die außerordentliche Kombination der ausgezeichneten Eigenschaften ist das Ergebnis der Molekularstruktur. Der Vergleich der Grundeigenschaften von kommerziellen erhältlichen Fluorkunststoffen ist in Tabelle 3.1 einsehbar.

**Tab. 3.1** Typische Eigenschaften der Fluorkunststoffe

Eigenschaft	PTFE	ETFE	PCTFE	PVDF	PFA
Chemische Struktur	$[-C_2F_4-]_n$	$[-C_2H_2F_2-]_n$	$[-C_2F_3Cl-]_n$	$[-C_2H_2F_2-]_n$	$[-C_2F_4-]_n[-C_3F_6O-]_m$
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,14 - 2,20	1,65 - 1,70	2,09 - 2,16	1,75 - 1,80	2,12 - 2,17
w (24 Std.) [%]	0,005 - 0,01	0,01 - 0,03	0,01 - 0,05	0,01 - 0,05	0,01 - 0,03
$T_m$ [°C]	327 - 345	255 - 280	210 - 212	170	300 - 310
$T_b$ [°C]	-200 - 260	-100 - 150	-250 - 175	-40 - 150	-150 - 260
$\sigma_m$ [MPa]	25 - 36	35 - 54	31 - 40	35 - 50	25 - 31
$E_t$ [MPa]	400 - 800	800 - 1100	1200-1600	1500-2200	480 - 800
$\epsilon_{tb}$ [%]	300 - 550	100 - 350	100 - 250	20 - 50	260 - 300
$\mu_s$ [-]	0,02	0,4		0,2 - 0,4	0,05 - 0,08
LOI [%]	95 - 96	30	90 - 95	44 - 83	95 - 96
Flußempfindlichkeit	+++	+	+	+	++
Hochenergie Strahlungsbeständigkeit	NEIN	JA	JA	JA	JA

+++ = hochgradig; ++ = mittelgradig; + = niedriger Grad



Ein zahlreich ausgewerteter Brenntest der Polymere ist der Test des Sauerstoffindex „LOI“, der die niedrigste notwendige Sauerstoffkonzentration ausdrückt, die den Brand unterstützen und erhalten würde. Die Luft erhält zirka 21 % Sauerstoff, d. h. ein Polymer mit einem LOI < 21 % ist an der Luft stark brennbar. Polymere mit einem LOI > 21 % haben eine geringere Brennbarkeit und Polymere mit einem LOI > 28 % bezeichnet man als selbstlöschend (unbrennbar).

Einer der wenigen Nachteile von *PTFE* ist, dass es keine **Beständigkeit gegen Hochenergiestrahlung** (es geht die Depolymerisation ein) besitzt. Weiterhin kann man es **nicht mit gewöhnlichen Kunststofftechnologien verarbeiten**. Es wird im Pressverfahren aus Staub unter Standardtemperatur bei einem Druck von 15 MPa bis 40 MPa oder mit dem Sinterverfahren in einem Ofen im Temperaturbereich von 360 °C bis 380 °C verarbeitet (über 400 °C findet Degradation statt). Die Geschwindigkeit der Abkühlung der Formstücke nach dem Sinterverfahren

beeinflusst die Materialeigenschaften stark. Das Material kann man auch durch die Extrusion von Pulver oder Paste verarbeiten, die sich mit Hilfe von Schmiermittel bilden lassen, dieses muss vor dem Sinterverfahren mit Hilfe von Wärmeeinwirkung oder durch die Extraktion mit Hilfe eines Lösungsmittels entfernt werden. Mit diesem Verfahren stellt man Rohre oder verschiedene Profile her. PTFE benutzt man hauptsächlich für Adhäsionsschichten, Antikorrosionsschutz, Rohrproduktion, Dichtungen, zur Isolation von Drähten und Kabeln, für Konstruktionsteile von Medizingeräten und in der Lebensmittelindustrie.

Das **Copolymer ETFE** wird durch die Polymerisation von *Tetrafluorethylen* mit *Ethylen* hergestellt. **Es weist eine hohe Transparenz** bis 97 % (größer als PC oder PMMA) und ist Glas sehr ähnlich. Es hat eine gute chemische Beständigkeit aber **keine Beständigkeit gegen Säuren, die im Molekül Chlor enthalten**. Aus allen Fluorkunststoffen weist es die geringste Brennbeständigkeit auf (LOI = 30 %). Gegenüber PTFE ist es **gegen Radioaktive und UV Strahlen beständig** und es lässt sich mit gewöhnlichen Verfahren hauptsächlich mit Spritzgießen und Kalandern verarbeiten. Dieses Polymer verwendet man vorwiegend in der Form von Folien und Platten z. B. für die Überdachung von Schwimmbecken und Sportzentren (es ersetzt die Flachgläser). Es wird auch für Ventile in der chemischen Industrie oder als Isoliermaterial in der Elektrotechnik eingesetzt.

Das **lineare Polymer PCTFE** bildet sich in der Polymerisation aus *gasförmigen Chlortrifluorethylen*, ist mäßig milchig trüb und hat eine hohe Neigung zur Sprödigkeit (Modifizierung ist notwendig). Im Vergleich zu PTFE kann man es mit gewöhnlichen Kunststofftechnologien verarbeiten. Es ist außerdem beständig gegen Hochenergiestrahlung, besitzt eine größere Härte und Festigkeit, sowie fast vergleichbare Adhäsionseigenschaften. Es wird für Konstruktionsteile wie Rohrleitungen, Gefäßbelag und Dichtungen verwendet. Dispersionen des Polymers werden als Schutzbeschichtung von Metallen eingesetzt.

Das **Copolymer PFA** stellt man mit der Polymerisationshilfe *Tetrafluorethylen* und *Perfluoralkylvinylether* her, welches in kleinen Mengen eingesetzt wird (bis fünf mol-Prozent). **Die Eigenschaften sind ähnlich dem PTFE. Es unterscheidet sich hauptsächlich in der Verarbeitung, denn es kann aus der Schmelze verarbeitet werden**. Es handelt sich um ein **transparentes Material** (bis 93 %) mit großer Beständigkeit gegen Korrosion unter Spannung. Copolymere wie PFA, aber auch MFA und a FEP weisen alle die ausgezeichneten Eigenschaften von PTFE auf. Sie

unterscheiden sich nur in der Temperaturbeständigkeit bei Dauerbenutzung: PFA (260 °C), MFA (250 °C), a FEP (205 °C). Diese Polymere werden in Form von Folien oder Rohren verwendet. Es kann auch für die Beschichtung von Metallen und zur Elektroisolation eingesetzt werden.



Abb. 3.1 Anwendungsbeispiele von Fluorkunststoffen

Das **lineare Polymer PVDF** gewinnt man durch die Polymerisation aus *Vinylidenfluorid*. Es hat sehr gute mechanische Eigenschaften, besitzt die **größte Steifigkeit** (Elastizitätsmodul) **aus allen Fluorkunststoffen** und hat eine bessere Beständigkeit gegen Witterungsalterung und Hochenergiestrahlung als PCTFE. Im Vergleich zu PTFE ist es nicht nur steifer, sondern auch härter und lässt sich mit gewöhnlichen Thermoplasttechnologien verarbeiten. Vergleicht man es mit anderen Fluorkunststoffen hat es den Vorteil einer niedrigen Dichte bei sehr guten mechanischen Eigenschaften. Es wird zur Beschichtung von Stahlbehältern, Behältern aus Glasfaserlaminat, für Pumpenkörper, Ventile und Gleitkomponenten verwendet.

### 3.2

### Polyphenylsulfid (PPS)

*Polyphenylsulfid* (PPS) sind **hydrophobe**, selbstlöschende (LOI = 43 – 47 %), **semikristalline Thermoplaste**, die in einer Polykondensationsreaktion meist unter erhöhter Temperatur und Druck aus *Paradichlorbenzen* und *Natriumsulfid* erzeugt werden. Die Reaktion findet gewöhnlich in einem polaren Lösungsmittel statt. Nachfolgend wird mit Hilfe einer Hydrierungsreaktion das Natriumchlorid entfernt.

Die Vorteile dieses Materials sind eine **ausgezeichnete Wärme-** und hauptsächlich **chemische Beständigkeit** (besser als bei Stahl) auch unter erhöhten Temperaturen. Langfristig benutzbar ist es bis Temperaturen von 200 °C bis 220 °C.

Die Thermische Degradation beginnt erst ab Temperaturen über 430 °C. Löslich ist es nur in aromatischen chlorierten Kohlenwasserstoffen (1-Chlornaphtalen) bei Temperaturen von über 200 °C. Unter diesen Temperaturen ist kein Lösungsmittel bekannt, welches die Molekularstruktur des Polymers auflösen kann.

PPS ist sogar bei höheren Temperaturen ein sehr guter elektrischer Isolator. Die Durchschlagfestigkeit ist bis 200 °C gewährleistet. Es wird vor allem auf dem Gebiet der Elektrotechnik für elektronische Teile, Teile von Pumpen, Druckmaschinen, LCD-Projektoren verwendet. In der Automobilindustrie wird es für Motorteile und zur Beschichtung von Stahl- oder Aluminiumpumpenteile eingesetzt.

PPS weist gute mechanische Eigenschaften auf (siehe Tab. 3.4), wie eine ausgezeichnete Kratzbeständigkeit und eine niedrige Kriechneigung. Beim Aufschlag auf den Boden, erzeugt es einen „metallischen“ Klang. Die Zugabe von PPS zu Fluorkunststoffen erhöht deren Kriechbeständigkeit und die Abrasion, bei Beibehaltung seiner chemischen und thermischen Beständigkeit. Es wird für die Produktion von Rohren und leistungsfähigen Bowdenzügen genutzt. Zu anderen Applikationen gehören die Membrane von Brennstoffzellen und Ozonfiltern (Sulfurgruppe wird beim Kontakt mit Ozon oxidiert und neutralisiert das Ozon). Unter Sonneneinstrahlung degradiert PPS mäßig infolge der UV-Strahlung. Darum ist es notwendig, es mit HALS-Reagens zu stabilisieren (sterisch beschattende Amine).



**Abb. 3.2** Anwendungsbeispiele von Polyphenylsulfid (PPS)  
(Bauteile von Pumpen, Turbopumpen, Luftpumpen, Microelektronikteile)

In Hinsicht der **geringen Viskosität** des PPS kann es leicht mit Versteifungsfüllstoffen verarbeitet werden (siehe Tab. 3.4.). Das Material PPS ist mit

Hinsicht auf seine elektrische Leitfähigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit sehr effektiv in der Kombination mit Carbon-Nanoröhrchen. Sie erhöhen die Viskosität der Kunststoffschmelze. Deshalb kann man diese nicht bei Polymeren mit hoher Viskosität benutzen. Bei der Verarbeitung von PPS kommt es zur Entwicklung korrosiver gasförmiger Produkte, was einen negativen Einfluss auf ausgewählte Teile der Verarbeitungseinrichtungen haben kann (Formen, Schnecke, Plastifizierzylinder, usw.). Der Korrosionsschutz dieser Teile wäre kostspielig. Darum verwendet man so genannte PAS Polymere – Mischungen aus PPS und verschiedenen antikorrosiven Inhibitoren in der Menge bis 0,1 % (z.B. Kalziumkarbonat, Zinkoxid, usw.) Es handelt sich dabei nicht um eine vollkommene Lösung. Meist gilt, dass sich mit größer werdender antikorrosiver Wirkung, die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Steifheit) verschlechtern. PPS weist eine große Adhäsion zu Stahl auf, was Probleme bei der Abformung gespritzter Teile verursacht. Für diesen Zweck werden dem Material verschiedene Trennmittel, wie die Ester der Buttersäure oder ähnliche zugefügt.

### 3.3

### Polyphthalamide (PPA)

*Polyphthalamide* (PPA) sind **semiaromatische Polyamide** mit aromatischen Ringen in der Spinalkette, was dem Kunststoff eine große mechanische Festigkeit und Wärmebeständigkeit verleiht. Es wird über die Reaktion von aromatischen Säuren mit aliphatischem Diamin hergestellt. Die Bezeichnung Polyphthalamid benutzte man früher, wenn mehr als 60 Mol-% des Anteils der Säure die Wiederholeinheit in der Kombination von Terephthalsäure (T) und Isophthalsäure (I) aufwies. Hergestelltes **PPA kann** in die Abhängigkeit der Kombination der verwendeten Monomere **entweder amorph oder semikristallin sein**. Wenn mehr als 55 % des Säureanteils des PPA aus Isophthalsäure besteht, ist das hergestellte Copolymer (PA 6 I) amorph. Semikristalline PPA basieren auf PA 6 T und wird über die Kondensation von Terephthalsäure und Hexamethyldiamin hergestellt. Im Vergleich mit gewöhnlichen (aliphatischen) Polyamiden PA 6 oder PA 6.6 haben PPA allgemein eine größere Festigkeit, bessere Kriechbeständigkeit, sowie eine bessere Beständigkeit gegen zyklische Belastung, eine größere Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur (siehe Tab. 3. 2), eine bessere thermische Stabilität, sowie

eine bessere chemische und hydrolytische Beständigkeit. Die Temperatur des Glasüberganges erhöht sich mit einem größeren Volumen an Terephthalsäure.

**Tab. 3.2** Typische Eigenschaften von aliphatischen PA und semiaromatischen PPA

Polymer	T <sub>g</sub> [°C]	T <sub>m</sub> [°C]	w (24 Std.) [%]	T <sub>b,max</sub> [°C]	E <sub>t</sub> [°C]	σ <sub>m</sub> [°C]
PA 6	50	215 - 225	1,3 - 1,9	100	1400	70-85
PA 6.6	50	250 - 260	1,2 - 1,5	120	2000	77-84
PPA (*sauber PA 6T)	92 - 140*	310 - 370*	0,36 - 0,75	140	3700	85
PPA + 45GF			0,11 - 0,13	190	17 100-17 300	230

In Hinsicht auf ihre Eigenschaften und ihren Preis **stellen sie lediglich einen Kompromiss zwischen traditionellen technischen Kunststoffen und speziellen Materialien dar**. Anwendung finden sie in anspruchsvollen Applikationen der Automobileindustrie. Typische Beispiele sind Teile des Kühlkreislaufes, Brennstoffsystems, der Luftabsaugung und der Heizung (siehe Bild 3.3).



**Abb. 3.3** Anwendungsbeispiele von Polyphthalamiden (PPA)  
(Teile der Automobilindustrie)

### 3.4

### Aromatische Polyamide (MPIA; PPTA)

Die bedeutendsten und am weitest verbreiteten Polyamidtypen sind Polyamide mit aliphatischen Ketten (PA 6, PA 6.6, PA 4.6, PA 11, usw.), die wie technische Kunststoffe verwendet werden. Auf dem Markt sind auch *aromatische Typen der Polyamide* in Form von Fasern erhältlich. Man bezeichnet sie als **Aramide**. Für die Polykondensation verwendet man die *Chloride der aromatischen Dicarbonsäuren*

und *aromatische Diamine*. Sie sind auch in Form von „Bienenwaben“ (Applikationen in der Kosmonautik), als Aramid Papier oder Folien verfügbar.

Zu aromatischen Polyamiden gehören zum Beispiel Poly(m-phenylen-isophthalamid), sogenannte **Meta-Aramide**, verkürzt MPIA, z. B. von der Firma DuPont unter der kommerziellen Bezeichnung *Nomex*, oder Poly(p-phenylen-tetraphthalamid), sogenannte **Para-Aramide**, verkürzt PPTA, die die Firma DuPont unter der kommerziellen Bezeichnung *Kevlar* liefert.

*Nomex* ist ein festes Material, das eine gute Abriebbeständigkeit hat. Man kann es nicht mit gewöhnlichen Technologien verarbeiten, weil es sich nicht schmelzen lässt. Über Temperaturen von 370 °C findet eine schnelle Degradation statt. Es wird nur im Pressverfahren verarbeitet oder im Verspinnen aus einer Polymerlösung, die das Ergebnis der Polykondensationsreaktion der Monomere bei seiner Synthese ist. Langfristig ist es im Temperaturbereich von 200 °C bis 250 °C haltbar, kurzfristig bis 300 °C.

*Kevlar* ist ein kristallines Polymer, das langfristig bis 260 °C einsetzbar ist. Seine Besonderheit ist, dass es keine Schmelztemperatur hat und bei der Überschreitung der Temperatur von 400 °C sublimiert. Die Absorption der Schlagenergie (z.B. durch einen Schuss) ist viermal größer als bei gewöhnlichen Polyamiden. Para-Aramid-Applikationen dienen deshalb hauptsächlich dem ballistischen Schutz.

Dank der vollaromatischen Struktur zeichnen sich die Polyamide durch eine **außergewöhnlich gute Wärmebeständigkeit, Feuerbeständigkeit und Beständigkeit gegen Chemikalien, sowie eine ultrahohe Festigkeit und Steifigkeit** aus (die Steifigkeit der Para-Aramid-Fasern im Zug ist mit einigen Stahlsorten vergleichbar oder größer, siehe Tab. 3.3). Darum verwendet man es zur Herstellung von Schutzanzügen und feuerfesten, mechanisch beständigen Handschuhen. Aramid-Fasern sind beständig gegen Ionisationsstrahlung, zeichnen sich durch ein minimales Kriechen aus und behalten auch bei wiederholter Belastung durch Druck und Biegung ihre Steifigkeit.

Man verwendet es z. B. als Isolationsfilme in der Flug- und Militärtechnik. Aramid-Fasern werden in der Reifenarmatur, als Transportbänder, pneumatische Federn und weitere hochfeste Komposite verwendet. Sie werden zur Herstellung von Seilen benutzt, beim Bau von Schiffs- und Flugzeugkörpern (z.B. kryogenische Brennstoffbehälter – Applikation im Weltraum), sowie zur Herstellung von Fahrrädern, Startkabeln, Antriebs-, und Getrieberiemern, High-Tech-Sportgeräten und

optische Fasern verwendet, siehe Abb. 3.4. Aramide dienen auch als Ersatz des unbrennbaren, karzinogenen Asbests.



**Abb. 3.4** Anwendungsbeispiele von Aramiden (MPIA, PPTA)  
(Aramid-Garne mit Glasfasern, optische Fasern, Kugelsichere Weste,  
Armatur beim Flugzeugskelettbau)

Wie der größte Teil der Kunststoffe sind auch Aramide **empfindlich gegen UV Strahlung**. Bei langfristiger Exposition kommt es zu Farbveränderungen (von gelb bis braun) und zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Werkstoffe zeigen eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme.

**Tab. 3.3** Typische Eigenschaften der Kevlar-Garne

Para-aramide	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$E_t$ [MPa]	$\sigma_m$ [MPa]	$\epsilon_{tb}$ [%]	Feuchtigkeitsabsorption [%]
Kevlar 29 (niedrigmoduliert)	1,44	83 000	3 600	3,6	3,5
Kevlar 49 (hochmoduliert)	1,44	124 000	3 600	2,4	7

3.5

Flüssigkristalline Polymere (LCP)

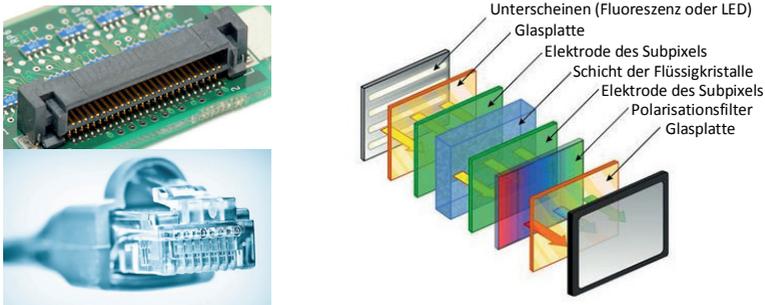
*Flüssigkristalline Polymere* (LCP) unterscheiden sich von Standardkunststoffen durch eine besondere molekulare Struktur der Schmelze. Diese besteht aus **rigiden (steifen) stäbchenförmigen Makromolekülen** (mit wachsender Steifigkeit der Kette erhöht sich auch die Schmelztemperatur), welche **im Schmelzzustand hoch geordnet** sind (im Unterschied zu Makromolekülen der gewöhnlichen Kunststoffe) und die Struktur der Flüssigkristalle schaffen. Mit der Abkühlung der Schmelze findet der Übergang in die feste Phase, bei Beibehaltung des flüssigkristallinen Zustands statt (der kristalline Zustand erhöht die Steifigkeit und Fähigkeit des Materials). Das

erste kommerziell genutzte flüssigkristalline Polymer war das aromatische Polyamid Kevlar der Firma DuPont. Die LCP-Materialien kann man mit verschiedenen Methoden, die für Thermoplaste angewandt werden, verarbeiten.

Die molekulare Struktur vom LCP bewirkt die hervorragenden Eigenschaften:

- ausgezeichnete Formbeständigkeit auch bei höheren Temperaturen (die **Wasseraufnahme** während 24 Stunden beträgt **0,03 %**),
- **außerordentliche Wärmebeständigkeit** auch bei sehr geringen Wanddicken (zulässige Betriebstemperatur: -200 °C bis 250 °C),
- hohe Beständigkeit gegen Chemikalien auch bei erhöhten Temperaturen (nicht beständig gegen konzentrierte Mineralsäuren oder alkalische Stoffe),
- **sehr große Steifigkeit** auch bei dünnwandigen Teilen (siehe Tab. 3.4),
- **niedriger linearer Ausdehnungskoeffizient**  $(0,3 - 0,7) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , fast wie Glas oder Keramik,
- natürliche selbstlöschende Eigenschaft (wirkt wie ein Brandhemmstoff).

Die Orientierung der Flüssigkristalle kann man mit einem elektrischen Feld beeinflussen. Das ist sehr interessant für LCD Bildschirme. Einige Flüssigkristalle werden in einem bestimmten thermischen Intervall elektrisch polarisiert, bei der Absenz des elektrischen Feldes – es handelt sich um die sogenannte Ferroelektrik.



**Abb. 3.5** Anwendungsbeispiele der polymeren Flüssigkristalle (LCP)  
(Elektronikteile, LCD Bildschirme)

Typische Eigenschaften von LCP sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. In Hinsicht auf die Schmelztemperatur von zirka 330 °C sind LCP bei langfristigen Belastungen bis Temperaturen von 250 °C, kurzzeitig bis 300 °C benutzbar. Es handelt sich dabei um nicht brennbare Polymere (LOI = 35 - 50 %), die man zur Herstellung von Fasern, in

der Automobilindustrie für Brennstoffzellen, in der Elektronik als wärmebeständiges Elektroisulationsmaterial, für Leiterplatten, Steckdosen, den Rahmen von Spulen, Schalter, Verbindungstücke, Klemmen von optischen Kabeln, Steckern, u.Ä. einsetzt (siehe Abb. 3.5). In der Medizin ersetzen sie rostfreien Stahl und sind geeignet für z. B. chirurgische Instrumente, sterile Körbe. Sie zeichnen sich durch eine exzellente Beständigkeit bei wiederholten Zyklen der Sterilisation, ähnlich wie PVDF, PFA, PI und PSU aus. Der Nachteil ist der hohe Preis (zirka 12 €/kg), der es zum **teuersten Polymer** macht.

### 3.6

## Polyaryletherketone (PAEK)

*Polyaryletherketone* (PAEK) sind hochleistungsfähige **semikristalline Thermoplaste**, deren Polymerkette *Aromatische-, Ether- und Ketongruppen* enthalten. Das Verhältnis und die Sequenz von Ether und Keton beeinflusst hauptsächlich die Temperatur des Glasüberganges und die Schmelztemperatur. Je größer der Anteil der Ketone ist, desto fester ist die Polymerkette und umso höher ist die Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur (siehe die Tab. 3.4). Zu Polyaryletherketonen gehören:

PEK	Polyetherketon,
PEEK	Polyetheretherketon,
PEKK	Polyetherketonketon,
PEEKK	Polyetheretherketonketon,
PEKEKK	Polyetherketonetherketonketon.

Polyaryletherketone zeichnen sich aus durch:

- **hohe Festigkeit bei höheren Temperaturen** und großer Kriechbeständigkeit (die Festigkeit und der Elastizitätsmodul sind größer als bei den technischen Kunststoffen PA, POM, PET). Zur weiteren Verbesserung der mechanischen Eigenschaften werden die Kunststoffe mit Carbon- oder Glasfasern gefüllt. Es ersetzt Stahl, Aluminium, Titan, Magnesium, Messing oder Bronze (bei markant niedrigerer Dichte des Materials),
- sehr gute Schlagbruchfähigkeit,
- gute Chemikalienbeständigkeit,
- **gute Gleiteigenschaften** ( $\mu = 0,25$ ) und Abnutzungsbeständigkeit,

- **niedrige Wasserabsorption** (0,02 % für PEK),
- **gute Beständigkeit gegen Radiostrahlen**,
- niedrige Witterungsbeständigkeit.

Dank seiner ausgezeichneten Gebrauchseigenschaften benutzt man ihn für hochbeanspruchte Konstruktionsteile in unterschiedlichen Temperaturbereichen (Temperaturbereich: -70 °C bis 240 °C langfristig, kurzzeitig bis 300 °C). Er zeichnet sich durch versenkende Verbrennung und selbstlöschender Eigenschaft aus (LOI = 24 - 35 %).



**Abb. 3.6 Anwendungsbeispiele der Polyaryletherketone (PAEK)**  
*(Bauteile: Pumpen, Binde- und Klemmelemente, chirurgische Instrumente mit Kohlenstoffbeschichtung, Lagerkäfige Kugellager, Zahnräder)*

Polyaryletherketone (siehe Abb 3.6) benutzt man z. B.:

- für die Produktion von Gleitlagern und Buchsen, durch Zugeben von PTFE verbessert man die Friktionseigenschaften,
- für Ladebatterien: Die Dichtungselemente sind gewöhnlich aus PP, womit eine schlechte thermische Beständigkeit erreicht wird. Bei höheren Temperaturen werden einige Elemente der Batterie bereits während der Herstellung mit Polypropylenteilen verlötet (dies wird durch Warmlöten bei 200 - 230 °C realisiert) und beeinträchtigt die Batteriekapazität, eine Optimierung könnte die Anwendung des Materiales PEEK bewirken,
- für Brennstoffglieder in der Kernindustrie,
- in der Medizintechnik für Systeme zur stufenweisen Freigabe von Arzneimitteln, für Instrumente und Geräte, die mit konventionellen Methoden sterilisiert werden müssen (Dampf, trockene Erwärmung, Ethylenoxide und Gammastrahlen),

- in der **orthopädischen** und **traumatologischen Praxis**, da es sich um ein biokompatibles Material handelt. Die Teile aus PEEK kann man zudem mit Diamantbeschichtungen oder mittels Plasma-Immersionen-Ionenimplantation und Deposition veredelten Oberflächen zur Verbesserung der Reibungseigenschaften ausstatten,
- für Werkzeugbeschichtungen,
- für die Luft- und Raumfahrtindustrie,
- zur Herstellung von mikroporösen Membranen für die Filtration und die Reinigung von z. B. Wasser.

### 3.7

## Polyphenylenether (PPE)

*Polyphenylenether* (PPE) sind **amorphe** hydrophobe **Thermoplaste** mit Glühverlust von LOI = 22 - 24 % und besitzen eine hohe Glasübergangstemperatur (ca. 205 °C). Zu ihren Vorteilen gehören auch die niedrige Dichte und die Hygroskopizität, die hohe Schlagzähigkeit, die elektrische Festigkeit, die chemische sowie thermische Beständigkeit (dauerhafte Anwendungsbereiche: -50 °C - 110 °C) und die ausgezeichnete Maßstabilität, welche durch den niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $(3 \text{ bis } 7) \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  resultiert. Zu den Nachteilen gehören umgekehrt: **schlechte Beständigkeit gegen über UV-Strahlen** und die **Alterung durch Oxidation bei Temperaturen über 100 °C**. Aus diesem Grund werden die Polymerblends mit Polystyrol (PS) genutzt, da deren Verarbeitbarkeit vereinfacht wird, sich jedoch die Wärmebeständigkeit dadurch verschlechtert und die Brennbarkeit somit steigt. Für die industrielle Nutzung werden zur Verbesserung der Schlagzähigkeit Styrol, Ethylen, Polypropylen und Butylen kopolymerisiert oder gemischt mit anderen Thermoplaste, wie z.B. PA 6, PA 6.6, PS-HI usw. zugegeben. Die Festigkeit kann weiterhin durch Faserverstärkung erhöht werden. Die Kompatibilität zwischen Fasern und der PPE Matrize ist sehr kompliziert und darum wird geeignet, die Fasern mit Vinylsilane oder Glycidoxypropyltrimethoxysilane benutzen.

In Hinsicht auf die ausgezeichneten mechanischen und elektroisolierenden Eigenschaften werden die Erzeugnisse aus diesem Material vor allem in der Automobil- und Elektrotechnikindustrie eingesetzt (z. B. in Hochspannungs-

schaltanlagen, für Haushaltsgeräte, Polymer-Elektrete – permanent polarisierte Körper), siehe Abb. 3.7. Ein weiteres bedeutendes Einsatzfeld des PPE ist das Gebiet der Separation und Herstellung poröser Membrane. Verwendung findet man auch bei niedrig-reversionsmäßiger Osmose, Nanofiltration, Separation von Gasen oder für Polymer-Elektrolyte. Die Eignung von PPE bei der Herstellung der Membrane ist durch das hohe freie Volumen begründet, was durch einfache Rotation der Phenylgruppen sogar große Diffusion und Permeabilität von Gasen ermöglicht.



*Abb. 3.7 Anwendungsbeispiele von Polyphenylenether (PPE) aus der der Elektrotechnikindustrie*

### 3.8

### Polysulphone (PSU)

Die Schlüsseleigenschaften der **amorphen Kunststoffe** sind die sehr guten mechanischen Eigenschaften und die sehr guten **thermischen und chemischen Stabilitäten**. Die Materialien sind selbstlöschend (LOI = 32 %), beim Verbrennen werden wenige Produkte freigesetzt, hochbeständig gegen die Wirkungen von Säuren, alkalischer Materialien, Salzlösungen, Alkohole und aliphatische Kohlenwasserstoffe. Im Gegenzug sind sie unbeständig gegen Ether, Ketone und halogene Kohlenwasserstoffe. Weiterhin zeigen sie eine sehr gute Löslichkeit in Dimethylformamid und Dimethylsulfoxid. Die Kunststoffe können im Temperaturbereich von -100 °C bis 160 °C eingesetzt werden. Zusätzlich zeigen sie eine gute **Beständigkeit gegen die Wirkung von radioaktiver Strahlung**. Wohingegen sie eine **schlechte Witterungs- und UV-Strahlenbeständigkeit aufweisen**.

PSU wird infolge der Eigenschaften für Automobilapplikationen, besonders im Motorraum (z. B. für Träger der Sicherungen), in der Flugzeug- und Elektrotechnikindustrie (z. B. für Schutzcontainer für industrielle Batterien) genutzt. Zudem wird es auch in medizinischen Einrichtungen, besonders für Hilfsmittel zur Sterilisierung bei höheren Temperaturen (z. B. für Flaschen der Absauganlagen) eingesetzt. Weiterhin ist es auch möglich, das Material als Ersatz für duroplastische Applikationen zu nutzen. Dabei können Metalle, Glas und Keramik substituiert werden und dabei besonders Leichtbauaspekte durch die niedrige Dichte umgesetzt werden. Polysulphone werden auch für die Produktion von Rohrleitungen einschließlich ihrer Verbindungselemente verwendet, welche in Kontakt mit warmen Medien, wie z. B. Wasser, kommen. Außerdem können Membranen für die Separation von Gasen (z. B. bei der Wasseraufbereitung und Hemodialyse) aus dem Material bestehen.



**Abb. 3.8** Anwendungsbeispiele von Polysulfone (PSU)  
(Teile der Medizintechnik, Rohrleitungen, Pumpen)

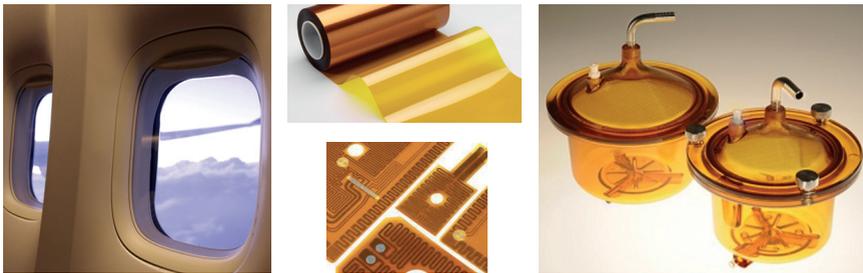
3.9

Polyimide (PI) und Polyetherimide (PEI)

**Polyimide** (PI) sind Polymere auf Basis von Thermo- und Duroplasten. Die Herstellung ist nur mit Hilfe von Vorpolymeren (Polyamide Präkursor), die man durch Polykondensation der *aromatischen Dianhydride mit aromatischen Diaminen* erzeugt, möglich. **Sie zeichnen sich durch die beste UV-Strahlenbeständigkeit gegenüber allen anderen Polymeren aus** (gemeinsam mit PAI), **besitzen eine hohe Festigkeit, ausgezeichnete dielektrische Eigenschaften und hohe Wärmebeständigkeit.** Langfristig können sie Betriebstemperaturen von  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis

300 °C, kurzzeitig bis 350 °C, ausgesetzt werden. Weitere Eigenschaften sind geringe thermische Leitfähigkeit, **ausgezeichnete Gleiteigenschaften** ( $\mu < 0,35$ ), durch Zugabe von PTFE, Graphit oder Molybdändisulfid, und eine Selbstlöschung (LOI = 47 - 53 %).

Ihre Verwendung (siehe Abb. 3.9) finden sie bei besonders anspruchsvollen Applikationen im Maschinenbau (z. B. bei Getrieben, als Lagerbuchsen, als Leitrollen, in der Vakuumtechnik als Membrane, für Sensoren und für Rohrleitungen in der Automobilbranche), in der Mikroelektronik (z. B. für optische Fasern) und in der Flugzeugindustrie (z. B. für polyimide Harze für thermisch belastete Bauteile als Isolation oder für Bauteile zur Schubumkehr in Strahltriebwerken. In der Raumfahrtindustrie benutzt man es als Schutzelemente für Raumschiffe und für die Isolation der Astronautenanzüge.



**Abb. 3.9** Anwendungsbeispiele der Polyimide (PI) und Polyetherimide (PEI)  
(Flug- und Raumfahrtindustrie, Elektro- und Medizintechnik)

**Polyetherimide** (PEI) sind eine Gruppe der Polyimide und damit **amorphe**, selbstlöschende **Thermoplaste** (LOI = 47 %), welche ausgezeichnete Formstabilität bei Wärmeeinwirkungen zeigen und sehr gute Kriechbeständigkeiten besitzen. Die Materialien können langfristig bei Temperaturen von 170 °C, kurzzeitig bis 200 °C, belastet werden. Sie sind beständig gegen Chemikalien, konzentrierte Säuren, alkalische Stoffe, Halogenkohlenwasserstoffe und Öle. Weiterhin sind sie in Dichlormethan und N-methylpyrrolidin lösbar.

In Hinsicht auf ihre Eigenschaften (siehe Tab.3.4) benutzt man sie vor allem in der Elektro- (z. B. als Isolationsmaterial für integrierte Schaltkreise und Leiterplatten, zur Herstellung von Steckverbindungen und für die Beschichtung von Kupferkabel), Automobil- (z. B. zur Herstellung von Sensoren und Ventilsteuerungen der Motoren,

aber auch für Sichtteile der Scheinwerfer), Flugzeug- (z. B. zur Herstellung von Fensterrahmen und Deckplatten) und Medizintechnik.

### 3.10

## Polyphenylensulfone (PPSU)

*Polyphenylensulfone* (PPSU) sind **amorphe Thermoplaste**, ähnlich wie Polysulphone (PSU), aber zeichnen sich durch höhere Beständigkeit gegen chemische Substanzen und Brandbeständigkeit (LOI = 44 %) aus. Sie sind unbeständig gegen die Einwirkung von halogenen Kohlenwasserstoffen. Langfristig kann man sie bis Temperatur von 180 °C, kurzfristig bis 200 °C, einsetzen. Typische Eigenschaften von PPSU sind in Tab.3.4. aufgeführt.

Polyphenylensulfone verwendet man in der Luft- und Raumfahrtindustrie z. B. für Innenkomponenten wie Speisewagen. In der Medizintechnik benutzt man sie vor allem für chirurgische und stomatologische Instrumente und Erzeugnisse, welche wiederholte Sterilisierung mit Hilfe von Chemie, Heißdampf oder Gammastrahlung, benötigen. Weiterhin kann man sie auch für die Herstellung von Rohrleitungen und deren Zubehör für beispielsweise warmes Wassers nutzen.



**Abb. 3.10** Anwendungsbeispiele von Polyphenylensulfone (PPSU)  
Medizintechnik für wiederholte Sterilisation

### 3.11

## Polyamidimide (PAI)

*Polyamidimide* (PAI) sind **amorphe**, selbstlöschende Thermoplaste (LOI = 45 %), die mit Hilfe der Polykondensation aus *Anhydrid der Trimellitsäure* und *aromatisches Diamin* hergestellt werden. **Sie stellen die Verbindung zwischen den**

**aromatischen Polyamiden** (auch als Aramide bezeichnet) und **Polyimide (PI)** dar. Die Kunststoffe sind **sehr gut gegen Hochenergiestrahlung**, gegen Witterungsbedingungen **und UV-Strahlung beständig**. Weiterhin haben sie eine sehr gute Beständigkeit gegen Chemikalien, u. a. aromatische, aliphatische und halogene Kohlenwasserstoffe, Ester und Ketone. Umgekehrt sind sie schlecht beständig gegen starke Säuren, alkalische Stoffe und Alkohole. Die Polyamidimide sind sehr gut hitzebeständig und langfristig im Temperaturbereich von -200 °C bis 220 °C (in einige Fällen bis 280 °C), kurzfristig bis 400 °C, einsetzbar. Sie besitzen eine hohe Kriech- und Abriebbeständigkeit.

Polyamidimide werden bevorzugt in der Flugzeug-, Automobil-, aber auch in der Medizintechnik (z. B. für die Herstellung von Tragteilen wie Prothesen) genutzt. Verwendung finden sie beispielsweise als Konstruktions- und Befestigungsteile von Flugzeug- und Raumschiffen, bei Flugzeugkompressoren und bei Dichtungselementen. Außerdem nutzt man sie für Reibungsteile (siehe Abb. 3.11), zur Produktion von Hohlfasern, für Membrane, als Lichtwellenleiter (PAI ermöglicht den Transport von Licht der Wellenlänge nahe Infrarotstrahlung, was gewöhnliche Kunststoffe nicht realisieren können), als Beschichtung und als Klebstoff.



**Abb. 3.11** Anwendungsbeispiele von Polyamidimide (PAI)  
(Zahnräder, Prothesen, Konsolen, Teile aus Industrieanwendungen)

### 3.12

## Polyethersulphone (PES), (PESU)

*Polyethersulphone* (PES oder PESU) sind **amorphe**, selbstlöschende Thermoplaste (LOI = 34 - 38 %), welche durch Reaktion von *Bisphenol A* und *4,4'-Dichlordiphenylsulphone* unter Einwirkung von  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  hergestellt werden. **Sie**

**zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften, hohe Maßhaltigkeit bei Einwirkung erhöhter Temperatur und guter Beständigkeit gegen Kriechen aus.**

Die Glasübergangtemperatur ( $T_g$ ) liegt im Bereich von 220 °C bis 238 °C. Die thermische Zersetzung liegt im Bereich von 400 °C bis 580 °C, in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren und der Sauberkeit der Rohstoffe. Eine langfristige Wärmebeständigkeit des Materials wird mit 180 °C angegeben. Die Materialien sind chemisch gut beständig, insbesondere gegen Chlor, bei Einwirkung verdünnter Säuren, alkalischer Stoffe, Alkohole und aromatischer Kohlenwasserstoffe. Schlecht beständig zeigen sie sich gegen starke Säuren, Ether und Ketone. Sie sind in Dimethylformaldehyd löslich.

Dank ihrer Eigenschaften finden sie in der Automobil- (z. B. für Sicherungen, als Nebelscheinwerfer und für Ölpumpen, siehe Abb. 3.12), in der Elektronik- (z. B. als Beschichtungen von Drähten, als Verbindungsstecker von optischen Faser, für Leiterplatten) und in der Medizinindustrie (z. B. als Filtrationsmembrane, Membrane für Reversionsosmose bei der Wasserdestillation - Vorteil: hohe Beständigkeit gegen Chlor, für Werkzeuge die mit Hilfe von heißem Dampf sterilisiert werden müssen) Anwendung. Auch im Dentalbereich wird der Kunststoff als Barriere gegen Zahnbelag (Belag wird durch Anionen der geladenen Polymere durch den umgekehrt geladenen Mikroorganismus vertrieben) eingesetzt.



**Abb. 3.12** Anwendungsbeispiele von Polyethersulphone (PES) - Teile von Scheinwerfern, Innenraumtüren von Flugzeugen - armiert mit Glasfasern, Pumpenteile

*Polybenzimidazole* (PBI) sind **amorphe**, selbstlöschende Thermoplaste (LOI = 58 %), die von allen kommerziell hergestellten Polymeren die größte Wärmebeständigkeit mit einer Glasübergangstemperatur von  $T_g > 400 \text{ °C}$  besitzen. Kurzfristig kann man PBI bis  $760 \text{ °C}$  ausnutzen, langfristig dann im Temperaturbereich von  $-260 \text{ °C}$  bis fast Glasübergangstemperatur. Außerdem besitzen sie eine hohe Festigkeit und Härte und zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- sehr niedriger Reibungskoeffizient ( $\mu = 0,16$ ),
- hohe Beständigkeit gegen Abrieb,
- sehr gute Beständigkeit gegen Kriechen - auch bei erhöhten Temperaturen,
- gute Elektroisulations- und Dielektrizitätseigenschaften,
- **beste Beständigkeit gegen durchdringende Strahlung**,
- **kleinster Wärmeausdehnungskoeffizient** (im Vergleich mit ungefüllten Polymeren),
- **größte Druckfestigkeit** (im Vergleich mit ungefüllten Polymeren).



**Abb. 3.13** Anwendungsbeispiele von Polybenzimidazole (PBI)  
(Fasern zur Herstellung von Schutzbekleidung, Teile für tribologische Anwendungen)

PBI sind aber **hygroskopisch** was ihre Anwendung in feuchter Umgebung einschränkt. Bevorzugt werden sie für anspruchsvolle tribologische Anwendungen eingesetzt. Es ist weiterhin möglich, andere Materialien, wie Metalle, zu ersetzen und auch die relativ niedrige Dichte als Leichtbaupotential zu nutzen. Die Materialien

finden auch in der Luft- und Raumfahrt-, Kern-, chemischen -, Automobil- und Elektrotechnikindustrie Anwendung. Einsatzbeispiele sind Teile von Pumpen, Zahnräder, Ventil Sitz, Lager aber auch die Herstellung von Fasern für die Herstellung von Schutzkleidung ist möglich, siehe Abb. 3.13.

### 3.14

## Elektrisch leitfähige (konjugierte) Polymere

Polymere sind gewöhnlich elektrische Isolierstoffe, was durch den Bindungscharakter der Verbindungen innerhalb der Makromoleküle resultiert. Jedoch kann durch Zugabe von Ruß oder Graphitstäuben eine elektrische Leitfähigkeit realisiert werden. Neben diesen leitenden Kompositen existieren auch die *konjugierten Polymere*, die eine hohe eigene elektrische Leitfähigkeit, welche halbleitendem Materialien in der Elektronik entsprechen, aufweisen können. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch regelmäßige Wechsel von einfach und doppelt chemischer Bindung (Konjugierung) in der makromolekularen Kette (siehe Abb. 3.14) ermöglicht. Außer diesem System der Bindungen ist die Existenz eines Trägers der Ladung notwendig, welche den Transport durch die Kette realisiert. Diese entstehen durch den Prozess Dopen. Ein gutes Beispiel ist das nach einfacher Struktur konjugierte Polymer: **Polyacetylen**, welches durch Polymerisation von *Acetylen* in den pulverförmigen Zustand mit geringer Leitfähigkeit entsteht. Nach der Oxidation (Dopen) mit Joddämpfen steigt die elektrische Leitfähigkeit bei dem dünnen Polyacetylenfilm extrem an. Von der Polymerkette wird das Elektron abgenommen, welches vom Jod-Molekül übertragen wird, was dadurch negativ aufgeladen ist. Das Polyacetylen-Molekül trägt dann eine positive Ladung. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit von gedoptem Acetylen erreicht Werte von 550 S/cm. Im Fall der Orientierung des Filmes können Werte bis  $10^5$  S/cm erreicht werden.

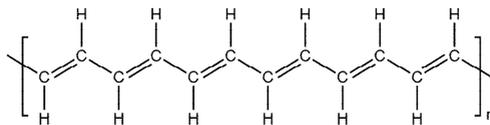


Abb. 3.14 Struktur eines konjugierten Polymers - Polyacetylen

Weitere Beispiele konjugierter Polymere sind **Polypyrrol**, **Polyanilin**, **Polyfenylen** usw. Die leitenden Polymere sind im Vergleich mit anderen Polymeren **schwierig verarbeitbar**. In gewöhnlichen Lösungsmitteln lösen sie sich nicht und können nicht in die Schmelze übergehen.

Leitende Polymere werden z. B. als Bestandteile elektronischer Einrichtungen, für antistatische Fußbodenbeläge, für optische Sensoren (indizierte Änderung von PH-Wert), als Widerstandsheizelemente, für die Nutzung in organischen Solarmodulen, beim Drucken von elektrischen Schaltkreisen, für organische lichtausstrahlende Dioden, für elastisch-transparente Bildschirme, für elektromagnetische Abschirmungen eingesetzt (siehe Abb. 3.15).



**Abb. 3.15** Anwendungsbeispiele von Spritzgießteilen aus elektrisch-leitenden Polymeren

Tab. 3.4a Typische Eigenschaften der Hochleistungspolymeren und ihre technologischen Bedingungen beim Spritzgießen

Polymer	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	w (24 Std.) [%]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_{fb}$ [%]
PPS	90 - 150	278 - 280	0,01 - 0,07	1,35 - 1,36	65 - 90	3 400 - 15 100	0,6 - 25
PPA	92 - 140*	310 - 370*	0,36 - 0,75	1,10 - 1,26	62 - 80	2 100 - 15 600	1,5 - 5,0
LCP	120 - 155	330	0,03	1,40 - 1,51	110 - 180	7 000 - 24 300	1,5 - 6,0
PEK	150 - 160	350 - 375	0,02	1,30 - 1,32	80 - 115	4 300	2,0 - 25
PEEK	143 - 150	340 - 344	0,06 - 0,5	1,29 - 1,32	72 - 113	3 350 - 4 700	1,5 - 41
PEKK	155 - 163	300 - 360	0,2	1,28 - 1,31	90	3 450 - 4 500	
PPE	205	-	0,06 - 0,12	1,02 - 1,10	40 - 75	2 000 - 2 700	15 - 130
PSU	185 - 220	-	0,20 - 0,30	1,23 - 1,32	60 - 80	1 800 - 2 600	73 - 75
PI	360 - 410		1,34 - 1,43	1,31 - 1,52	100 - 150	3 100 - 10 500	2 - 19
PEI	194 - 233	-	0,20 - 0,30	1,27 - 1,30	93 - 113	2 800 - 3 500	6 - 9
PPSU	220	-	0,35 - 0,40	1,29 - 1,30	70 - 76	2 300 - 2 800	28 - 90
PAI	206 - 326	-	0,20 - 0,40	1,40 - 1,46	70 - 80	4 000 - 7 000	0,8 - 15
PES (PESU)	220 - 238	-	0,10 - 0,90	1,37 - 1,39	78 - 92	2 600 - 3 000	6 - 7
PBI	400 - 510	-	0,40	1,30 - 1,42	160	5 900	3

\* sauber PA 6T;  $T_g$  – Glasübergangstemperatur;  $T_m$  – Schmelztemperatur; w – Wasseraufnahme während 24 Stunden;  $\rho$  – Dichte;  $\sigma_m$  – Zugfestigkeit;  $E_t$  – Elastizitätsmodul;  $\epsilon_{fb}$  – Nominelle Bruchdehnung

**Tab. 3.4b** Typische Eigenschaften der Hochleistungspolymere und ihre technologischen Bedingungen beim Spritzgießen

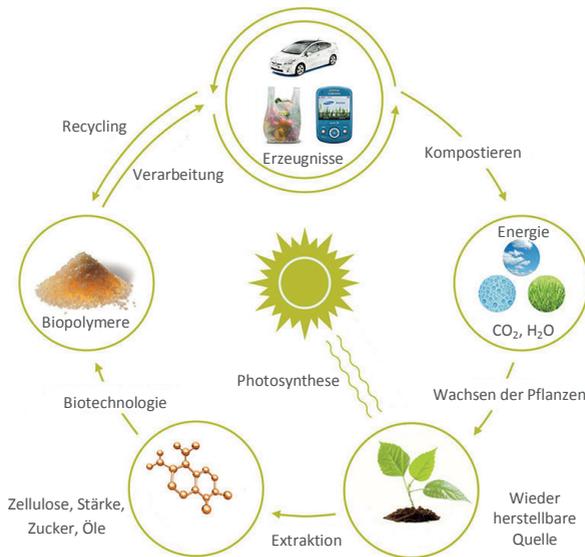
Polymer	Schwindung [%]	T Spritzgießen [°C]	T Spritzgießwerkzeug [°C]	Fasernamierung	Beständigkeit Gama Strahlung	Beständigkeit UV Strahlung
PPS	0,6 - 1,4	315 - 335	145 - 160	G, C, A, M	++	++
PPA	1,5 - 2,2	315 - 330	80 - 160	G, C, A, M	++	+
LCP	0,1 - 0,6	290 - 370	80 - 140	G, C, M	++	++
PEK	1,0 - 1,3	385 - 425	180 - 220	G, C		
PEEK	1,2 - 1,5	375 - 390	180 - 190	G, C, A	+++	++
PEKK		320 - 380	150 - 240	C		
PPE	0,5 - 0,8	275 - 320	55 - 100	G, C, M	+	+
PSU	0,7	350 - 370	120 - 150	G, C	++	+
PI	0,2 - 1,2	395 - 410	160 - 165	C	+++	+++
PEI	0,7 - 0,8	370 - 395	150	G, C	++	+
PPSU	0,7 - 1,0	360 - 390	135 - 160	G	+++	++
PAI	0,6 - 1,0	304 - 370			++	+++
PES (PESU)	0,6 - 0,7	350 - 365	135 - 160	G, C	++	+
PBI					+++	

G – Glas, C – Kohlenstoff, A – Aramid, M – Mineral

# 4

# IOBASIERTE UND BIOLOGISCH ABBAUBARE KUNSTSTOFFE

**Biopolymere** sind makromolekulare Stoffe auf organischer Basis, welche **mittels biochemischer Reaktion von Pflanzen, Tieren oder Mikroorganismen** aus niedermolekularen Stoffen **produziert werden**. Aus chemischer Sicht handelt es sich um *Polysaccharid* (Stärke, Zellulose), welche aus Pflanzen, *Proteinen und Eiweißstoffen*, der Grundlage lebender Organismen, erzeugt werden und *Polyester*, welche aus Mikroorganismen mittels Bakterien (z. B. PHB, PHV) produziert werden und biologisch abbaubar sind. Nach der Erfüllung ihrer Funktion können sie nochmals Teile des Umweltzyklus zugeführt werden (siehe Abb. 4.1). Folgende aufgeführte Beispiele gehören in die Gruppe der Naturbiopolymere. Das vielleicht bekannteste Beispiel ist das *Zellophan*, eine dünne transparente Folie, die aus der chemisch-regenerierten Zellulose hergestellt wird.



**Abb. 4.1** Model des Lebenszyklus eines Biopolymers

Biopolymere unterscheiden sich gegenüber synthetischer Kunststoffe durch den chemischen Bau der Makromolekularkette. Im Vergleich zu den synthetischen Polymeren, enthalten sie immer Sauerstoff oder Stickstoff, die den biologischen Abbau ermöglichen. Nach ihrer Herkunft ist es möglich, diese in zwei Gruppen zu unterteilen:

- **Biopolymere aus natürlicher Herkunft** – produziert aus lebenden Mikroorganismen,
- **Synthetische Biopolymere** – werden nicht aus Biomolekülen (Monomeren) der Natur synthetisiert. Sie besitzen keine ähnlichen Parameter wie makromolekulare Stoffe. Gewöhnliche Beispiele sind monomere Milchsäuren (Laktide), welche durch Fermentation von Zucker hergestellt werden. Aus dieser Säure wird durch ein chemisches Verfahren die Polymilchsäure (PLA), Triglycerole und verschiedene Aminosäuren hergestellt, aus welchen man z. B. bioabbaubare Polyamide produziert.

**Bioabbaubare Polymere** sind Polymere, welche durch die Einwirkung von Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Pilze und Algen, welche Enzyme zur abbaubaren Reaktion enthalten und beschleunigen) ihren Abbau durchführen. Diese nehmen Kunststoffe als Lebensmittelquelle wahr. Weiterhin wirken andere chemische und physikalische Einflüsse. Alle Biopolymere und vereinzelt Polymere mineralischer Herkunft zählen zu der besonderen Gruppe - den modifizierten synthetischen Polyolefinen, siehe Kap. 4.5.



**Abb. 4.2** Bioabbau eines Einweg-Trinkbechers aus PLA (Zeitreihe)

Entstehende Produkte beim Abbau sind unter spezifischen Bedingungen *Kohlenstoffdioxid* (beziehungsweise *Methan*), *Wasser* und *restliche Biomasse*. Letzteres sind Stoffe, die wieder in den natürlichen Kreislauf als Nährstoffe eingehen. Der Abbauprozess wird als Mineralisation bezeichnet. Bei Anwesenheit von

Sauerstoff (z. B. bei der industriellen Kompostierung) handelt es sich um den **aeroben Abbau** mit dem Endprodukten Kohlenstoffdioxid, im anderen Fall spricht man von nicht **aeroben Reaktion** (z. B. Deponierung) unter Entstehung von Methan (Es gibt auch Fälle, wo beide Gase entstehen). Diese zwei Bioabbaumöglichkeiten können in Wasser oder auf Bodenumgebungen verlaufen (siehe Abb. 4.2) und werden durch Nährstoffe, Temperatureinwirkungen, Feuchtigkeit, pH-Wert, UV-Strahlung u. ä. beeinflusst. Bei extrem ungünstigen Bedingungen können Mikroorganismen absterben und der Abbauprozess wird praktisch gestoppt.

Bioabbaubare Polymere sind gute Alternativen zu synthetischen Polymeren und werden für Erzeugnisse der Verpackungsindustrie oder in der Landwirtschaft für einmalige Benutzung eingesetzt. Neue Applikationen findet man auch in der Biomedizin (z. B. bei der Produktion von modernen Verband-, Nahtmaterialien, bei speziellem orthopädischem Ersatz, welcher mechanische Implantationen in verletzte Knochen ermöglicht und den Heilprozess begünstigt).

Zu den industriell eingesetzten Biopolymeren aus natürlicher Herkunft gehören die Polysaccharide auf Stärkebasis und den Polyhydroxyalkanoate (PHA), zu den synthetischen Biopolymeren auf Naturbasis danach die Polymilch- (PLA) und Polyglykolsäuren (PGA) und zu den synthetisch bioabbaubaren Polymeren (im Gegenteil zu den Biopolymeren) gehören die Polyvinylalkohole (PVA), Polycaprolaktone (PLC) und oxo-bioabbaubare Kunststoffe, deren Quelle Monomere aus der Erdölgewinnung darstellen.

## 4.1

## Polymere auf Stärkebasis

Die **Stärke** (Naturbiopolymer) ist das günstigste aller Biopolymere und wird durch Photosynthese von Zucker aus Mais, Weizen, Gerste, Kartoffel und aus weiteren Pflanzen gewonnen. In sauberer Form ist sie spröde, pulverförmig und **besitzt hygroskopische Eigenschaften**. Nach der Zugabe von Plastifikatoren bei erhöhter Temperatur und durch Druck (z. B. Wasser mit Glycerin oder Polyethylenglykol) wird sie thermoplastisch und kann gewöhnlichen Technologien für die Kunststoffverarbeitung zugeführt werden (siehe Tab. 4.1). Der limitierende Faktor der industriellen Verwendung sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften (niedrige Festigkeit und geringe Beständigkeit gegen in Wasser), siehe Tab. 4.2. In

der Praxis werden sie mit anderen synthetischen Polymeren, z. B. *Polyethylen niedriger Dichte* (PE-LD), *Polyvinylalkohol* (PVA) oder *Polykaprolakton* (PCL), gemischt. Die letzten zwei genannten sind komplett bioabbaubare Stoffe. Für die Erzeugung der vollständig bio-abbaubaren Mischung PE/Stärke ist es notwendig, den Bioabbau des Polyethylens mit passenden Additiven sicher zu stellen.

Kunststoffe auf Stärkebasis verwendet man für die Herstellung kompostierbarer Folien, als Einwegverpackungen, für Haushaltswaren, für hygienische Bedarfsartikel oder für spezielle Sammelbehälter von Krankenhauskleidung, welche sich während des Wäschewaschens auflösen. Aus dem Material werden auch extrudierte Schäume für die Verpackungsindustrie hergestellt.

**Tab. 4.1** Verarbeitungsmöglichkeiten bioabbaubarer Polymere

Polymer	Spritzgießen	Extrusion	Blasformen	Umformung	Gießen	Verspinnen
Stärke	✓	✓	-	-	✓	-
Stärke/PVA	✓	✓	✓	-	✓	✓
PHB	✓	✓	✓	✓	✓	-
PHV	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PHBV	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PLA	✓	✓	✓	✓	-	✓
PVA	✓	✓	-	✓	✓	✓
PCL	✓	✓	✓	✓	-	✓
oxo- PE, PP	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**Tab. 4.2** Typische Eigenschaften von bioabbaubaren Polymeren

Polymer	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]	$\sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_{tb}$ [%]	Schwindung [%]
Stärke	1,40-1,50	80-100	165-180	$\geq 30$	1 500	$\leq 10$	
PHA	1,25-1,40	2-15	160-180	15-40	1 000-2 000	1-15	1,2-1,6
PLA	1,21-1,25	45-65	150-165	21-60	350-3 500	2,5-6	0,3-1,1
PGA	1,50-1,53	35-40	220-225	70-890	6 000-8 400	15-30	
PVA	1,20-1,33	58-85	180-230	28-46	380-530	100-200	
PCL	1,11-1,15	-60	55-65	21-44	160-400	300-1 000	

*Polyhydroxyalkanoate* (PHA) sind **Natur-Biopolymere auf Basis von Polyester**, welche mittels Bakterien hergestellt werden (kommerzielle Prozesse nutzen bakterielle Kulturen in Bioreaktoren). Vertreter der Kunststoffgruppe sind *Polyhydroxybutyrat* (PHB), *Polyhydroxyvalerat* (PHV) und das Copolymer *Polyhydroxybutyrat-valerat* (PHBV). Die Kosten je Kilogramm Kunststoff liegen zwischen 3 € und 14 €. **Biopolymere PHB haben ähnliche mechanische Eigenschaften wie Polypropylen (PP)**, u. a. sind sie beständig gegen Feuchtigkeit (wasserunlöslich), UV-Strahlung und Oxidation. Ihr Nachteil ist, dass sie **sich in der Nähe der Schmelztemperatur** von 180 °C **zersetzen und sich damit sehr schwierig verarbeiten lassen**. Dieses **Problem ist bei der Verarbeitung des Copolymer PHBV gelöst**. Es lässt sich durch die gewöhnlichen Verarbeitungsverfahren für Kunststoffe verarbeiten, siehe Tab. 4.1. Der biologische Abbau ist im Boden, in Süß-, sogar in Salzwasser und durch Kompostierung möglich. Durch Bakterien oder Pilzen durchgeführt, wird die Oberfläche des Polymers angegriffen und durch Enzyme hydrolytisch zersetzt. Die Polymere finden z. B. in der Medizintechnik, für die Herstellung von kontinuierlich freigebenden Arzneimitteln, für Implantate, für Fixierhilfsmittel, wie chirurgische Fäden (siehe Abb. 4.3), in der Verpackungsindustrie oder für die Produktion von hygienischen Artikeln Anwendung.



**Abb. 4.3** Anwendungsbeispiele von Biopolymeren PHBV und PLA

*Polymilchsäure* (PLA) ist ein **linearer thermoplastischer Polyester** aus *Milchsäure*, welches z. B. durch Fermentation von Pflanzenzucker aus Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben entsteht. Dieses synthetische Polymer hat ähnliche

**mechanische Eigenschaften wie Polyolefine**, siehe Tab. 4.2. Sie sind verhältnismäßig **hoch transparent**, in Wasser unlöslich, beständig gegen UV-Strahlung, durchlässig für Gase, was ein großer Vorteil für Lebensmittelpackung darstellt, aber ungeeignet für die Herstellung von Flaschen, welche Kohlensäurehaltige Getränke beinhalten. Auf Grund der Stereometrie der Milchsäure, kann man **PLA mit verschiedenen Kristallinitätsstufen**, Dichten, Glasübergangs- und Schmelztemperaturen herstellen. Bei amorphen PLA sind Applikationen bei höherer Temperatur durch die Glasübergangstemperatur begrenzt.

Das Polymer PLA ist nach den Stärkebasiskunststoffen das preiswerteste Biopolymer mit Kosten unter 2 €/kg. Verwendung findet man bei der Herstellung von Folien, abbaubarer Mülltüten und von Verbrauchsgütern, wie Einwegbestecke, -Teller oder -Getränkebecher (siehe Abb. 4.2), aber auch in der Medizintechnik bei der Produktion von Fixierungselementen zur Befestigung von Implantaten, für das Verkleben von Knochen zur schnelleren Regeneration oder für andere technische Applikationen. Der Nachteil von PLA ist auch die **große Durchlässigkeit für Gasteilchen**, welche dreifach größer gegenüber Polypropylen (PP) und 10-fach höher gegenüber Polyethylenterephthalat (PET) ist. Weiterhin eignet es sich nicht für Verpackungen von Kohlensäurehaltigen Getränken. Kommerzielle Erzeugnisse sind im Meerwasser oder durch Kompostierung bei erhöhter Feuchtigkeit und Temperaturen um 60 °C biologisch abbaubar.

## 4.4

## Polyglykolsäure (PGA)

*Polyglykolsäure* (PGA) ist ein **thermoplastisches Polymer**, welches aus *Glykolsäure*, mittels Fermentation z.B. aus Zuckerrohr, hergestellt wird. In den meisten organischen Lösungsmitteln ist es beständig, jedoch beginnt bei Wassereinwirkung Hydrolyse. Verarbeitungen sind durch Spritzgieß- und Extrusionsverfahren möglich. Anwendungen findet man besonders in der Medizintechnik für die Herstellung von speziellen Implantaten, bei chirurgischen Nähten und für kontinuierliche Arzneimittelfreigabe. Eine besondere Eigenschaft des Polymers ist die kurze Zeit des biologischen Abbaus, welches durch Copolymerisation von Milchsäure (PLGA) abläuft.

*Oxo-Bioabbaubare Polymere* sind speziell modifizierte, kommerzielle, **synthetisch bioabbaubare Polymere** (meist auf Basis von *Polyolefinen* oder *Polystyrol*). Sie enthalten keine Stabilisatoren, welche bei kommerziell eingesetzten Polymeren verwendet werden. Umgekehrt benötigen sie **spezielle Additive zur Modifizierung** (meist Salze der Übergangsmetalle), welche als **TDPA** (Totally Degradable Plastic Additives) bezeichnet werden. Diese Additive ermöglichen die Abbaubarkeit, welche durch fotochemische Oxidation initialisiert wird. Bakterien, Schimmelpilze und Enzyme zersetzen die Produkte durch Oxidationsabbau des Polymers zu Kohlenstoffdioxid, Wasser und Restbiomasse. Die Zusatzstoffe ermöglichen die Variation der Dauer des Materialabbaus (zwischen 3 bis 12 Monate). Die Erzeugnisse aus dem Polymer entsprechen Anforderungen zum Einsatz in der lebensmittelverarbeitenden Industrie. Verwendung findet man für Lebensmittelverpackung, Einkaufstaschen, Folien zur Nutzung in der Landwirtschaft, im Baugewerbe und sogar in der Medizintechnik.

Außer dem Fotooxidations-Abbau ist es möglich, spezielle Polymere auch bei erhöhter Temperatureinwirkung zu zerstören.



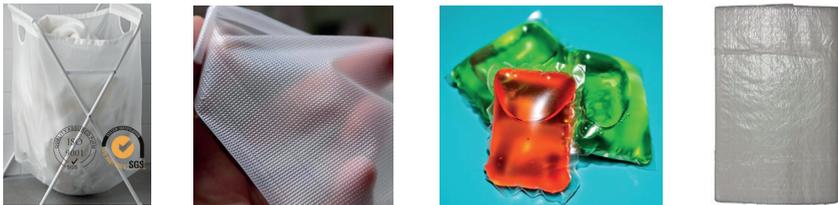
*Taschen aus Oxo-Polyethylen werden erst in Kontakt mit Licht, Feuchtigkeit und mechanischen Spannung abgebaut. – durch geeignete Verpackungen konserviert man die Taschen bis zur Nutzung.*

Ähnlich verhält sich gewöhnlich aromatisches Polyester: *Polyethylenterephthalat* (PET) und *Polybutylenterephthalat* (PBT), welche beständig gegen Hydrolyse sind, allerdings keine bioabbaubaren Stoffe darstellen. Durch Modifikation mittels Monomeren, kann die empfindliche Hydrolyse (z. B. durch Ether, Amide oder mittels aliphatischer Gruppen) bei aliphatisch-aromatischen Polyestern die Fähigkeit der Bioabbaubarkeit verändert werden.



*Gewöhnlicher Irrtum ist, dass alle bioabbaubaren Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Biologisch abbaubare Polymere enthalten keine synthetischen Stoffe, lediglich Natur bioabbaubare Füllungen, wie beispielsweise Holzmehl oder Leinenfasern.*

*Polyvinylalkohol (PVA)* ist ein **synthetisch semikristallines voll biologisch-abbaubares Polymer, welches in Wasser löslich ist**. Es wird durch Polymerisation von *Vinylacetat (VAC)* zu *Polyvinylacetat (PVAc)* und danach zu *Polyvinylalkohol (PVA)* hydrolysiert. Der biologische Abbau ist durch die Existenz von Hydroxylgruppen in der Makromolekularkette, die den hydrophilen Charakter dieses Polymers bewirken, möglich. Das Polymer PVA ist **biologisch kompatibel**, nicht toxisch, nicht krebserzeugend und hat ausgezeichnete chemische Eigenschaften. Aus diesem Grund wird es für Verbrauchsgüter, wie Folien in der Agrarindustrie, z. B. für die Lieferung von Düngemittel, Pestizid, Herbizid und Fungizid benutzt (siehe Bild 4.4). Weiterhin findet es in der Medizintechnik und in der Pharmazie, z. B. für dosierte kontinuierliche Abgabe von Arzneimitteln, als Verbandmaterial, für chirurgisches Nahtmaterial oder für Implantate, Anwendung. Hier wird es auch als Nanofaserträger für die Regeneration von Knorpelgewebe benutzt. Außerdem kann es zur Therapie von Embolie genutzt werden, da das Mittel zur Senkung des Blutdurchflusses beiträgt. Durch den hydrophilen Charakter wird es oft mit anderen Polymeren, wie Halbmilchsäure (PLA), Polyglykolsäure (PGA) oder Polylacton (PCL) gemischt.



**Abb. 4.4** Anwendungsbeispiele von *Polyvinylalkohol (PVA)*

*Polykaprolakton (PCL)* ist ähnlich wie PVA ein **linear semikristallines, biologisch vollständig abbaubares Polymer**, welches aus dem Rohstoff Öl durch (Polymerisation  $\epsilon$ -*Kaprolakton*) hergestellt wird. Ein **Unterschied gegenüber PVA ist die sehr gute Beständigkeit in Wasser**. Es hat eine sehr niedrige

Glasübergangstemperatur von  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , weist eine große Bruchdehnung auf, hat eine niedrige Festigkeit und besitzt einen relativ kleinen Elastizitätsmodul (siehe Tab. 4.2). Im Vergleich mit den Polymeren PLA und PGA ist die Abbaufähigkeit geringer. Es wird in der Medizin und in der Textilindustrie eingesetzt. In der Abbildung 4.5 wird das Beispiel eines Halsimplantates dargestellt. Durch die Wirkung von Körperflüssigkeiten, wird es nach 3 bis 4 Jahren vollständig aufgelöst.



*Abb. 4.5 Halsimplantate aus Polymer PCL*

Die **Technologie des Spritzgießens** hat in dem Industriezweig, der sich mit der Verarbeitung von Kunststoffen beschäftigt, eine unersetzliche Rolle. Es handelt sich um eine Technologie, die sich seit ihrer Einführung stets verändert und an die Anforderungen der Konstrukteure, Technologen, der Hersteller der Polymermaterialien und der Hersteller der Spritzgießformen angepasst hat. Der Grundstein der Technologie des Spritzgießens wurde in den 40er Jahren des vorangegangenen Jahrhunderts geschaffen und überlebte bis heute. Während dieser Zeit haben sich jedoch die Maschinenanlagen und zu verarbeitenden Materialien verändert. Vornehmlich haben die Veränderungen auf dem Gebiet der zu verarbeitenden Materialien wesentlich zur Entwicklung und Weiterbildung der Technologie des Spritzgießens beigetragen.

Das Spritzgießverfahren ist ein schwieriger technologischer Vorgang, der die typischen Materialeigenschaften berücksichtigen sollte. Weil dieses Verfahren in einfachster Form aus den drei Hauptteilen besteht: das **Polymerschmelzen**, die **Ausfüllung des Werkzeughohlraumes** und die **Schmelzerstarrung**, soll die Technologie folgende Materialeigenschaften berücksichtigen:

- *Schmelzflusseigenschaften*,
- *thermische Eigenschaften von Kunststoffen* (Schmelztemperatur, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, usw.),
- *die übermolekulare Struktur des Kunststoffes* und ihre möglichen Änderungen infolge der Verarbeitung.

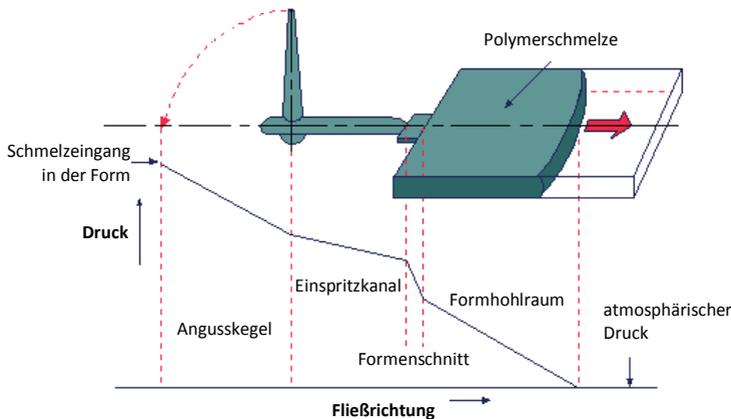
Die *Rheologie*, die das Fließverhalten der Schmelze beschreibt, reflektiert eine charakteristische Eigenschaft der Polymermaterialien - die viskoelastische Eigenschaft. Die Polymerschmelze zeigt die sogenannte Scheinviskosität. Deshalb ist es notwendig mit der Änderung des Fließverhaltens in Folge der Temperaturveränderung und der Änderung der Schergeschwindigkeit zu rechnen. Die Viskosität der Polymerschmelze bewegt sich im Bereich von 2 Pa·s bis 300 Pa·s. Den Unterschied im Fließverhalten der Polymere kann man sehr gut am Beispiel von Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) und Polyamid (PA) sehen. Bei der Erwärmung von PE-LD erweicht der Kunststoff markant und seine Viskosität ändert sich gemächlich. Aus

dem Festkörper entsteht stufenweise eine hoch viskose Masse, die nur bei weiterer Erwärmung fließfähig ist. Dagegen verändert sich das Material PA unter Erwärmung sehr schnell und geht aus dem festen Zustand in die Schmelze über (sprunghaft).

Die Polymermaterialien haben eine zirka fünffach größere spezifische Wärmekapazität als Metalle und deren Wärmeleitfähigkeitskoeffizient ist viel geringer. Diese thermischen Eigenschaften bestimmen im Grunde den energetischen und zeitlichen Aufwand von Schmelzen und Erstarren der Polymermaterialien während der Verarbeitung. Jedes Material hat eine andere empfohlene Verarbeitungstemperatur, die vom Hersteller auf der Basis von Übergangstemperaturen festgelegt werden (die Schmelztemperatur im Fall der semikristallinen Kunststoffe und die Temperatur vom Viskositätsfluß für amorphe Kunststoffe). Die empfohlenen Temperaturen der Materialverarbeitung sind um 20 °C bis 30 °C nur geringfügig höher als die Schmelztemperatur ( $T_m$ ), respektive die Temperatur vom Viskositätsfluß ( $T_f$ ). Je größer die Temperatur des Polymers ist, desto größer ist die Beweglichkeit der Makromoleküle. Sie können sich so einfacher der Scherbeanspruchung anpassen, der sie beim Spritzgießen ausgeliefert sind. Über die Erhöhung der Temperatur lässt sich die Schmelzviskosität verringern, aber bei bestimmten Temperaturen werden die Polymere thermisch instabil und beginnen sich zu zersetzen. Diese Zersetzung wird als **thermische Degradation** bezeichnet und zeigt sich meistens durch eine Farbänderung der Schmelze (gelb bis braun). Sie ist auch nach der Viskositätsänderung nicht reversibel.

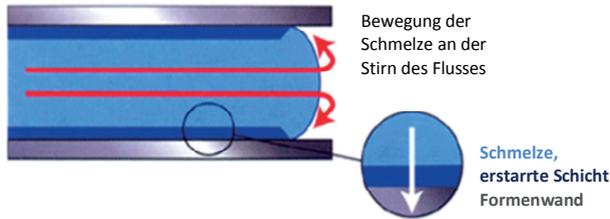
Ähnliche Wirkungen wie Wärme auf die Polymerschmelze hat die Scherbeanspruchung. Die *Scherbeanspruchung* bewirkt die Senkung der Schmelzviskosität. Bei unangemessen hoher Scherbeanspruchung kommt es zur mechanischen Beschädigung makromolekularer Ketten und somit zur Degradation der Polymere. Für die Technologie des Spritzgießverfahrens ist eine gute thermische Stabilität des Materials notwendig, denn die Kombination aus Wärmeeinwirkung und Scherbeanspruchung kann zur Degradation führen. Die Degradation der Polymere zeigt sich in der Verringerung des Molekulargewichtes, wobei von dem Molekulargewicht die Schmelzviskosität, sowie die mechanischen Eigenschaften des Polymers abhängen. Nicht zuletzt ist es notwendig auch die Verweilzeit des Materials im Heizzylinder der Spritzgießmaschine zu berücksichtigen, weil dies eine markante Rolle für den Degradationsprozess spielt.

In der ersten Phase wird das Material in der Spritzeinheit plastifiziert. Beim Plastifizieren geht das Polymer in die Schmelze über und wird homogenisiert. Nach dem Plastifizieren ist die aufgeschmolzene Dosis zum Einspritzen in den Formhohlraum bereit. Um die Einspritzung zu ermöglichen, muss der Druck in der Spritzeinheit (vor der Schneckenstirnfläche), den Widerstand der Schmelze überwinden. Wenn der Druck hoch genug ist, beginnt die Schmelze sich aus dem Hochdruckgebiet (in der Spritzeinheit der Spritzgießmaschine) in das Gebiet mit dem niedrigeren Druck zu bewegen (das Angussystem und der Formhohlraum), wie in Abbildung 5.1. dargestellt wird. Je größer der Druckgradient ist, desto schneller ist der Schmelzfluss.



**Abb. 5.1** Schmelzdruck in den einzelnen Phasen während des Spritzgießens

Bei der Einspritzung ist die Schmelze hauptsächlich der Scherbeanspruchung und in kleinerem Maß auch der Längsbeanspruchung ausgesetzt. Die Längsbeanspruchung geschieht besonders an den Punkten mit einer plötzlichen Verkleinerung der Maße, wie zum Beispiel im Anguss, jedoch überwiegt die Scherbeanspruchung auf die Schmelze. Das Prinzip des Flusses der Schmelze im Angussystem und im Formhohlraum ist in Abbildung 5.2. dargestellt.



**Abb. 5.2** Schmelzbewegung beim Fluss im Formhohlraum

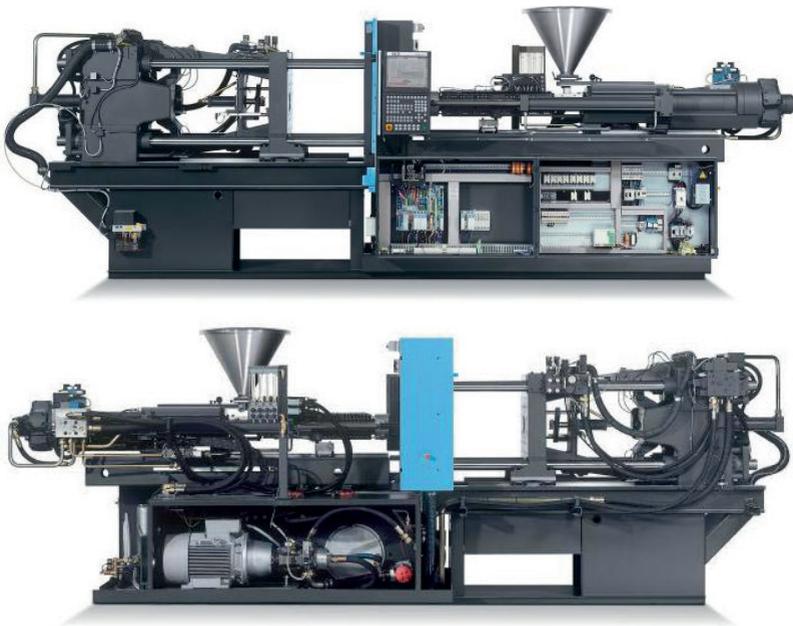
Im ersten Augenblick des Einspritzens trifft das Material im Formhohlraum auf einen relativ niedrigen Druck, beim Kontakt mit der Form, verliert es an Wärme und beginnt zu erstarren. Es bildet sich eine erstarre Schicht, die stufenweise wächst. Mit der Vergrößerung der erstarren Schicht sinkt die Größe des flüssigen Kernes stark (die Lücke, wo die Schmelze fließt) und die Schergeschwindigkeit der Schmelze nimmt im Kern markant zu. Die Scherbeanspruchung welche auf die Schmelze wirkt, verursacht die Orientierung der Makromoleküle. Die Schmelze wird dadurch zu viskos und damit kommt es nicht zur vollständigen Freisetzung der Innenspannung. In Folge dessen zeigen ungefüllte Kunststoffe einen größeren Anteil an Längsschwindung gegenüber der Querschwindung.

## 5.2

## Spritzgießmaschine

Zum Detailverständnis des Spritzgießverfahrens ist es notwendig die Konstruktion und Funktionsweise einzelner Teile der Spritzgießmaschine zu kennen. Die wichtigsten Teile der Spritzgussmaschine (siehe Abb. 5.3.) sind:

- die Spritzeinheit,
- der Rahmen der Maschine mit den hydraulischen und elektrischen Antrieben,
- die Steuer- und Regeleinheit,
- die Schließeinheit.



**Abb. 5.3** Spritzgießmaschine ohne Verkleidung – vordere und hintere Ansicht

### 5.2.1 Spritzeinheit

Die erste Aufgabe der Spritzeinheit ist das *Plastifizieren des Materials*, das heißt das Material geht in die Schmelze über und die Schmelzdosis wird homogenisiert. Nachdem die Dosis der Schmelze vorbereitet ist, weicht sie dem angelegten Druck aus und gelangt durch die *Einspritzung* in den Hohlraum des Werkzeugs. Bei der Einspritzung der Schmelze hält die Spritzeinheit die eingestellte Geschwindigkeit bis zum Erreichen des sogenannten Umschaltpunktes aufrecht. Ab dem Umschaltpunkt wird der Druck aufgehoben, wobei die Spritzeinheit den eingestellten Druck in der restlichen Schmelzmenge aufrechterhält (*Nachdruckphase*). Bei allen oben beschriebenen Vorgängen ist, in Hinsicht auf die Qualität der Spritzgussteile, die Funktionsstabilität der Spritzeinheit sehr wichtig, d.h. die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der eingestellten Parameter, wie z. B. die Einspritzgeschwindigkeit, der Druck in der Nachdruckphase, der Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke und andere.

Innerhalb eines Jahres wurden deutliche Änderungen in der Konstruktion der Spritzeinheiten vorgenommen. Die erste Generation der Spritzgießmaschinen hatte einen Kolben in der Spritzeinheit. Das Material wurde durch den Kontakt mit dem warmen Zylinder aufgewärmt. Es erfolgte keine Durchmischung, weshalb die Erwärmung relativ viel Zeit in Anspruch nahm und die Schmelze nicht den gewünschten Grad der Homogenität aufwies. Anschließend wurde das Material in den Hohlraum des Werkzeuges mittels Kolbens eingespritzt. Dieser Typ der Spritzeinheit wurde stufenweise durch die Schneckenspritzeinheit ersetzt, die gegenüber der Kolbeneinheit eine Reihe an Vorteilen besitzt. Die *Kolbenspritzeinheiten* benutzt man heute nur noch in einem gewissen Maß. Hauptsächlich werden sie für spezifische Applikationen eingesetzt, z. B. für die Verarbeitung von Materialien, die empfindlich auf die Scherbeanspruchung reagieren.

Die **Schneckenspritzeinheit** (siehe Abb. 5.4) ist zurzeit der Standard bei den Spritzgießmaschinen. Diese Konstruktion hat gleich mehrere Vorteile. Die Homogenität der Schmelze ist wesentlich höher, und das gilt für die Homogenität der Verteilung der Füllstoffe (zum Beispiel des Pigments bei der Färbung), sowie für die thermische Homogenität der Schmelze. Ein weiterer Vorteil ist die geringere Viskosität der Schmelze durch den Einfluss der Scherbeanspruchung, der das Material beim Durchgang der Schneckenrinne ausgesetzt ist. Und nicht zuletzt der große Vorteil der markant geringeren Verweildauer des Materials in der Schmelzkammer der Maschine. Die thermische Beanspruchung des Materials ist wesentlich geringer, somit sinkt auch das damit verbundene Risiko der thermischen Degradation. Zu den bedeutenden praktischen technologischen Eigenschaften gehört die sogenannte Selbstreinigungsfähigkeit, welche ein geringeres Risiko des verbackens des Materials in der Spritzeinheit bewirkt. Die Selbstreinigungsfähigkeit nutzt man beim Materialwechsel aus, indem die Zufuhr des bestehenden Materials gestoppt und mittels wiederholter Dosierung und Einspritzung des Materials „herausgefahren“ wird. Wenn die Einheit leer ist, wird damit begonnen das neue Material zu dosieren, mit dem gleichen Vorgang der wiederholten Dosierung und Einspritzung. Dank dessen drückt das neue Material die Reste des ursprünglichen Materials aus der Schmelzkammer der Spritzeinheit, ohne das eine Demontage erforderlich wäre.



**Abb. 5.4** Spritzeinheit

Jede Spritzeinheit wird charakterisiert durch technische Parameter, wie z. B.:

- Spritzgießkapazität,
- Plastifizierleistung,
- maximaler Einspritzdruck.

Die **Spritzgießkapazität** ist die maximale Menge des Materials, die die Maschine aus der Schmelzkammer während einer Einspritzung einspritzen kann. Sie wird entweder in Volumeneinheiten ( $\text{cm}^3$ ), oder in Gewichtseinheiten ausgedrückt, wenn dieses Gewicht für Polystyrol (PS) definiert ist. Bei anderen Materialien ändert sich die gewichtsmäßige Einspritzkapazität, da es notwendig ist die unterschiedlichen Materialdichten zu berücksichtigen (siehe Kapitel 1, Tab. 1.1a).

Die **Plastifizierleistung** ist die maximale Geschwindigkeit der Vorbereitung der Polymerschmelze. Sie wird für Polystyrol (PS) in der Einheit  $\text{kg/h}$  ausgedrückt. Hier ist es notwendig zu beachten, dass die Einspritzung ein diskontinuierlicher Prozess ist und darum die Leistung im Vergleich zum Extruder geringer ist. Die Plastifizierleistung hängt auch von der Dosisgröße, dem Schneckendurchmesser, den Schneckenumdrehungen und der Leistung der Heizungszone ab. Gleichzeitig sind auch der konkrete Materialtyp und die Gesamtdauer des Einspritzzyklus zu berücksichtigen.

Der **maximale Einspritzdruck** ist der Druck, auf den die Spritzeinheit dimensioniert ist, und bei dem die Maschine die Polymerschmelze in der Phase der

Einspritzung herausdrückt und in der Nachdruckphase aufrechterhält. Diese Werte geben die Maschinenhersteller in der Einheit bar, in der Größenordnung von 1500 bar bis 2500 bar, an.

Die Spritzeinheit besteht hauptsächlich aus den folgenden Bauteilen:

- dem Einfülltrichter,
- dem Plastifizierzylinder,
- der Schnecke,
- der Rückstromsperre,
- der Düse,
- der Heizungszone,
- des Antriebes der Rotationsbewegung der Schnecke,
- des Antriebes der linearen Bewegung der Schnecke.

### **Einfülltrichter**

Der Einfülltrichter, meist aus rostfreiem Material, wurde vom Hersteller so konstruiert, dass das Granulat kontinuierlich in die Füllöffnung der Spritzeinheit rinnt, wobei das Granulat nirgendwo haften bleiben sollte. Die Form des Einfülltrichters kann variieren und soll eine einfache Reinigung ermöglichen. Für die Materialien, die schnell Luftfeuchtigkeit absorbieren, kann der Einfülltrichter mit einer Heizung ausgerüstet sein. Die Mehrheit der Spritzgießmaschinenhersteller bieten sogar Einfülltrichter mit eingebautem Sieb oder Magneten, die das Eindringen größerer Teilchen und metallischer Verschmutzungen in die Schmelzkammer verhindern sollen.

### **Plastifizierzylinder**

Der Plastifizierzylinder (siehe Abb. 5.5) ist ein Zylinder mit genauer Bohrung (durch Honen hergestellt), in dem die Schnecke gelagert ist. Er ist mit einer Beschichtung für die Erhöhung der Härte, beziehungsweise Korrosionsbeständigkeit ausgestattet. Die Kammer ist außen mit Heizelementen ausgerüstet, die bei gewöhnlichen Maschinentemperaturen bis 350 °C und bei Maschinen für die Verarbeitung von Hochleistungspolymeren Temperaturen bis 400 °C erreichen können. Dennoch wird der Großteil der Wärme zum Herstellen der Polymerschmelze (zirka 2/3) durch

Reibung und den Einfluss der Scherbeanspruchung entwickelt. Das Granulat erwärmt sich an den Wänden der Schmelzkammer und der Schnecke. Das geschmolzene Material befindet sich zwischen der Schnecke und dem Zylinder in einer nur dünnen Schicht (aufgrund der niedrigen thermischen Leitfähigkeit des Polymers), um die thermische Homogenisierung zu erzielen.



**Abb. 5.5** *Plastifizierzylinder*

### **Schnecke**

Die Schnecke der Spritzgießmaschine ist hinsichtlich der Qualität des gespritzten Teils das Schlüsselteil. Im Grunde genommen könnte man für jedes Polymermaterial eine ideale Geometrie erzeugen. Das würde aber bedeuten, dass bei jeder Änderung der Materialzusammensetzung auch die Schnecke umgetauscht werden müsste. Deshalb benutzt man in der Praxis eine universale Schneckengeometrie, die für eine breite Palette der gewöhnlich genutzten Materialien verwendet wird. Der am häufigsten genutzte Schneckentyp ist die **Drei-Zonen-Schnecke**, deren Geometrie in Abbildung 5.6. dargestellt ist. Sie besteht aus den folgenden drei Zonen:

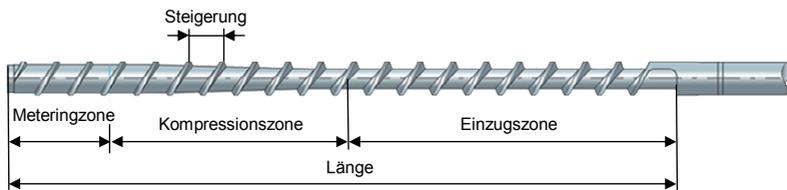
- Einzugszone,
- Kompressionszone,
- Meteringzone.

Die **Einzugszone** zeichnet sich durch eine tiefe Rille aus, die die Aufgabe hat, eine große Menge des Granulats aus dem Einfülltrichter der Maschine zu schöpfen und stufenweise in die Kompressionszone der Schnecke zu transportieren. In dieser

Zone ist das Granulat kaum der Scherbeanspruchung ausgesetzt und wird im Grunde stufenweise von den Heizbändern erwärmt.

Die **Kompressionszone** (Übergangszone) der Schnecke weist eine stufenweise Vergrößerung des Schneckenkernes, also der Verkleinerung der Gewindetiefe auf. Dadurch ist das Material zunehmend der Scherbeanspruchung ausgesetzt. Dies führt zur Wärmeentwicklung durch Reibung und das Material wird intensiv geschmolzen. Gegen Ende der Kompressionszone ist die Gewindetiefe sehr klein und das gesamte Granulat sollte schon geschmolzen sein. Die Luft, die sich am Anfang der Kompressionszone zwischen dem Granulat befindet, wird dank der Kompression des Materials gegen die Bewegungsrichtung herausgedrückt.

Die **Meteringzone** (Ausstoßzone) ist die letzte Schneckenzone und garantiert die Vermischung der Schmelze. In diesem Teil ist die Gewindetiefe gleich der des Endes der Kompressionszone, damit das Material thermisch homogen ist.



**Abb. 5.6** Geometrie der Drei-Zonen-Schnecke

Zum wichtigsten technischen Parametern der Schnecke gehören:

- der Schneckendurchmesser ( $D$ ),
- das Verhältnis aus Länge ( $L$ ) und Durchmesser ( $D$ ), und
- das Kompressionsverhältnis.

Der **Schneckendurchmesser** ist das Grundmaß der Schnecke und sollte dem Innendurchmesser der Schmelzkammer der Spritzeinheit (Zylinder) entsprechen. Der Durchmesser wird in Millimeter angegeben und bewegt sich zwischen 15 mm bis 200 mm. In speziellen Fällen kann er auch wesentlich größer sein; zirka 200 mm bis 300 mm (bei großen Maschinen für die Herstellung von Spritzteilen der Masse von einigen zehn Kilogramm).

Ein sehr wichtiger Parameter der Schnecke ist ihr **L/D Verhältnis**. Es handelt sich dabei um das Verhältnis zwischen Schneckenlänge (L) und Durchmesser (D). Für die Verarbeitung von Thermoplasten beträgt dieses Verhältnis minimal 20:1. Für die Verarbeitung von Duroplasten, Elastomeren und flüssigen Silikonen ist es ungefähr 14:1. Weiterhin benutzt man sogenannte verlängerte Schnecken, für die sich das Verhältnis um 24:1 bewegt. Diese Schnecken sind für die Verarbeitung von Material mit Farbzusätzen bestimmt, am häufigsten für Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), weil es eine bessere Vermischung des Farbstoffes sichert. Verlängerte Schnecken mit höherem L/D Verhältnis eignen sich für die Einspritzung mit kurzen Herstellungszyklen.

Das **Kompressionsverhältnis** ist als Verhältnis zwischen der Gewindetiefe in der Transportzone und der Gewindetiefe in der Homogenisierungszone definiert. Für jedes Material ist ein bestimmtes Kompressionsverhältnis passend. Zum Beispiel beträgt das empfohlene Verhältnis für Polyamide (PA) 3:1 (bei einem Schneckendurchmesser von 30 mm und dem L/D Verhältnis = 20:1). Das gewöhnliche Kompressionsverhältnis für Thermoplaste ist 2:1 und für Materialien, die empfindlich auf Scherbeanspruchung reagieren, für Polyvinylchlorid (PVC) zum Beispiel, beträgt es zirka 1,6:1. Für die Verarbeitung von Elastomeren und flüssigen Silikonen nutzt man die Schnecke auch ohne Kompression (also 1:1).

Wie weiter oben schon ausgeführt, wird für die Herstellung von Teilen in kurzen Zyklen oft eine Schnecke mit höherem L/D Verhältnis genutzt, also eine *verlängerte Schnecke*. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung einer Schnecke mit speziellen Mischzonen. Die *Mischzonen* verwendet man hauptsächlich in Fällen, die eine hohe Homogenität der Schmelze bezüglich Temperatur und Dispergierung der Füllung fordern. Der Grad der Homogenität hängt hauptsächlich von den folgenden zwei Kriterien ab:

- der Verweilzeit der Schmelze in der Mischzone, und
- der Durchmischung der Schmelze.

Das wichtige Kriterium der Mischzonen ist der Druckverlust, der möglichst gering sein sollte, damit es nicht zur Verringerung der Plastizität des Materials kommt. Eine der am häufig eingesetzten Mischzonen ist die sogenannte rhombische Zone, die sehr ähnlich auch für die Extrusion benutzt wird. Dieser Zonentyp zeichnet sich durch gutes Kneten (Vermischen) der Schmelze bei

gleichzeitigem Aufrechterhalten der Transporteffektivität (Das Material wird durch den Einfluss der Schneckenumdrehungen nach vorn transportiert).

Die Benutzung der *verlängerten plastifizierenden Schnecken* ist vorteilhaft bei der Verarbeitung der folgenden Materialien und Bedingungen:

- *Kunststoffe mit großer spezifischer thermischer Kapazität*, zum Beispiel PE, PP und PA und das beim Einhalten der folgenden Bedingungen:
  - ✓ eine kurze Zykluszeit,
  - ✓ mittlere Zykluszeiten und ein großes Einspritzgewicht (mehr als 50 % des Volumens der maximalen Dosis),
- *Compounds, die empfindlich auf Scherbeanspruchung reagieren* (die Wärmeentwicklung aufgrund der verringerten Scherbeanspruchung ist kleiner, deshalb ist es notwendig den fehlenden Wärmeanteil mittels Heizung zuzuführen),
- *Kunststoffe mit zugefügten farbigen Masterbatch*, welche einen hohen Grad an Homogenität des Farbstoffs fordern,
- *bei Senkung der Temperaturen der Schmelze auf ein Minimum* aus dem Grunde der geforderten Zykluszeit (resp. der Kühlungszeit) oder der Elimination des Risikos der thermischen Degradation des Materials.

### **Spezielle Schneckentypen**

Zu speziellen Schneckentypen gehört die *Barrierschnecke* (siehe Abb. 5.7), welche ein ständiges Abtrennen der Schmelze von den festen Teilchen des Kunststoffes bewirkt. Der Unterschied ist ein zweiter Gewindegang in der sogenannten Barrierezone, die die Kompressionszone ersetzt. In dieser Zone werden die festen Teilchen des Kunststoffes an die beheizte Schmelzkammerwand gedrückt. Am Anfang diese Zone beginnt der zweite Gang des Schneckengewindes, dessen Flanke (Drossel) im Vergleich mit dem ursprünglichen Gang etwas geringer ist – flacher. Zwischen der Stirnfläche dieses Gewindes und der Wand der Schmelzkammer ist ein Zwischenraum definiert. Damit sind zwei Kanäle geschaffen. Jeder Gewindegang hat eine andere Funktion: feste Teilchen und die Schmelze werden durch die Barriredrossel getrennt. Die Steigerung in der Barrierezone ist wesentlich größer als in der Zone der Füllung, damit das erforderliche Volumen im zweiten Gewindegang erreicht wird. Das Spiel der Barriredrossel ist so gewählt, dass feste Teilchen nicht übergangen werden können, aber auch so, dass die

Scherbeanspruchung des Kunststoffes gewährleistet ist. Feste Teile des Granulats werden ständig an die Wand der Schmelzkammer gedrückt und die Barriere wischt die entstandene Schmelze ins zweite Gewinde. Das zweite Gewinde wird stufenweise wesentlich tiefer, als das erste, weil es nicht mehr erforderlich ist, die Schmelze mit festen Teilchen zu vermischen. Somit sind höhere Schneckenumdrehungen als bei der Drei-Zonen-Schnecke möglich. Es verbessert sich die Homogenisierung des Materials, sowie die Vermischung mit Pigmenten und weiteren Additiven.



**Abb. 5.7** Barrierschnecke

Dieser Typ der Schnecke zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- große Plastifizierleistung,
- niedrige Schmelztemperaturen,
- vollständiges Schmelzen des Granulats.

Aufgrund ihrer Vorteile wird die Barrierschnecke vorrangig in der Herstellung größerer Teile verwendet, (weil eine größere Plastifizierleistung erforderlich ist). Umgekehrt ist diese Schnecke nicht für die Verarbeitung von Material mit Faserfüllung geeignet.

### **Rückstromsperre**

Die Rückstromsperre (siehe Abb. 5.8) ist der wichtige Teil der Spritzeinheit, die mittels eines Gewindes am vorderen Ende der Schnecke befestigt wird. Die Konstruktion der Rückstromsperre kann variieren, besteht aber aus den folgenden drei Teilen:

- an der Spitze mit Kanälen für den Durchgang der Schmelze,
- aus Ringen,
- aus einer Unterlegscheibe mit Abdichtfläche.



**Abb. 5.8** Rückstromsperre

Die Rückstromsperre ist bei der Einspritzung fast aller Materialien notwendig. Die Funktion besteht darin, den Rückfluss der Schmelze während der Phase der Einspritzung, des Nachdrucks und der Fließerscheinung zu vermeiden. Die Rückstromsperre verhindert zudem einen unerwünschten Druckverlust während des Einspritzvorganges. Bei der Plastifizierung des Materials kann die Sperrkonstruktion den Schmelzfluss nach vorn (vor der Schneckenstirn) beschränken und bei der Einspritzung in den Hohlraum des Werkzeugs, sowie in der Nachdruckphase soll sie die maximale Dichtheit garantieren. Die Rückstromsperre wird während des Prozesses sehr beansprucht und unterliegt einem größeren Risiko der Abnutzung.

### **Düse**

Die Düse stellt die Verbindung zwischen Plastifizierzylinder und Werkzeug sicher. Ihre Aufgabe ist der Transport der Schmelze in den Hohlraum des Werkzeuges, beziehungsweise in sein Angusssystem bei minimalem Druckverlust. Die Düse ist auch wichtig, um beim Kontakt mit dem kühlen Werkzeug den minimalen Verlust an thermischer Energie zu garantieren. Die Heizung der Düse wird mit Hilfe von Heizelementen sichergestellt. Die Temperatur wird mithilfe des Thermoelements gemessen (ähnlich wie beim Plastifizierzylinder). Die Befestigung der Düse zur Schmelzkammer erfolgt durch einen Flansch, der mit Hilfe von Hochfestigkeitsschrauben fixiert wird. Die Verbindung zwischen Düse und Zylinder muss dicht sein, um ein Ausströmen an der Dichtungsfläche und die Degradation zu verhindern. Man unterscheidet die Düsen in zwei Konstruktionstypen:

- geöffnet,
- verschließbar mit Nadel.

Die Bedienung der verschließbaren Düsen mit Nadel wird verschieden realisiert, am häufigsten jedoch mithilfe einer Feder, beziehungsweise einem Hebel, der

pneumatisch oder hydraulisch (speziell bei großen Düsen) betätigt wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Form der Aufsitzfläche der Düse, die die Dichtheit zwischen der Düse und Werkzeug garantiert. Diese existiert in zwei Ausführungen:

- Aufsitzfläche mit Abrundung (siehe Abb. 5.9),
- flache Aufsitzfläche.



**Abb. 5.9** Einspritzdüse

### **Abnutzung der Spritzeinheit**

Die Spritzeinheit und speziell deren Einzelteile werden während des Einspritzprozesses stark belastet. Darum kann man bereits nach relativ kurzer Zeit Zeichen von Abnutzung feststellen. Diese Kennzeichen der Abnutzung sind insbesondere ein ungenaues Materialpolster, eine unpräzise Dossierungszeit und ein schwankendes Gewicht der Einspritzteile. Die Instabilität des Prozesses senkt die Qualität der Einspritzteile. Die häufigsten Ursachen der Abnutzung der Spritzeinheit sind:

- abrasive Füllstoffe des Materials, wie z.B. Glasfasern, metallische Fasern, keramischer Staub, usw. (siehe Abb. 5.10),
- die chemische Struktur des Kunststoffes (speziell bei PVC, Materialien mit Brandschutzstoffen, Materialien mit Fluoriden, u. ä.),
- falsch ausgewählte technologische Parameter (zu hohe Plastifizierleistung/ -geschwindigkeit, zu hoher Staudruck, falsch eingestelltes Temperaturprofil, u. ä.).



**Abb. 5.10** Abrasive Abnutzung der Einzugszone der Drei-Zonen-Schnecke

Der Zylinder und die Schnecke werden aufgrund der Lebensdauer mit Beschichtungen für die Erhöhung der Oberflächenhärte bzw. die Beständigkeit gegen Korrosion versehen. Der am häufigsten angewandte Beschichtungstyp ist *Nitrieren*. Die Oberflächenschicht von Nitriden ist sehr hart und gleichzeitig glatt, was für die Bewegung des Materials durch den Zylinder erwünscht wird. Der Nachteil der Nitrierschicht ist die relativ geringe Dicke, die zwischen 0,1 mm bis maximal 0,3 mm beträgt. Unter der Nitrierschicht sinkt die Härte sprunghaft. Daher beschleunigt sich die Abnutzung der Schnecke sobald eine Beschädigung oder ein Aufbruch der Nitrierschicht vorliegt. Beim Einspritzen eines stark abrasiv wirkenden Materials, zum Beispiel mit einem großen Gehalt an Glasfasern, wird der Gebrauch einer *Spritzeinheit mit Bimetall-Zylinder* empfohlen.

### **Auswahl der Spritzeinheit**

Für die richtige Auswahl der Spritzeinheit ist es notwendig die folgenden Faktoren abzuwägen:

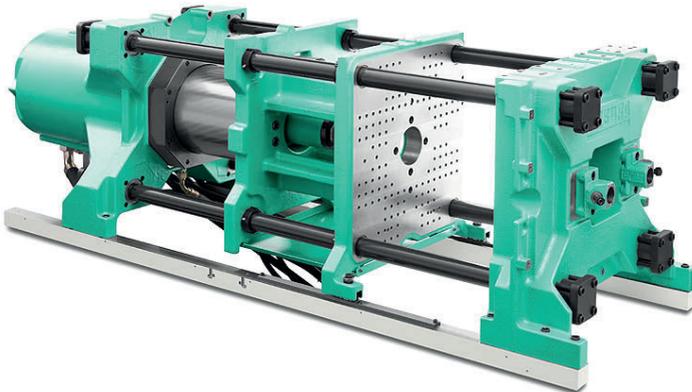
- **Typ der Düse:**
  - ✓ flach,
  - ✓ mit Abrundung,
  - ✓ offen oder verschließbar.
- **Auswahl der Schnecke und des Zylinders mit Rücksicht auf das zu verarbeitende Material:**
  - ✓ die Geometrie der Schnecke,
  - ✓ die Beschichtung der Schnecke und des Zylinders,
  - ✓ die Größe der Spritzeinheit (das Dosiervolumen sollte 20 % bis 80 % der maximalen Einspritzkapazität betragen),

- ✓ genügend hohe Plastifizierleistung der Maschine.

## 5.2.2 Schließeinheit

Die Schließeinheit ermöglicht die Bewegung des Einspritzwerkzeugs während des Öffnens und Schließens und garantiert gleichzeitig mit der Schließkraft das Schließen des Werkzeuges während des Spritzzyklus. Die Schließeinheit gibt es in verschiedenen Ausführungen. Der häufigste Typ ist die **hydraulische Schließeinheit** mit dem Führungsstift (siehe Abb. 5.11). Diese Einheit besteht aus den folgenden Grundbauteilen:

- einer festen Spannplatte,
- einer beweglichen Spannplatte,
- des Führungsstifts, und
- des hydraulischen Zylinders.



**Abb. 5.11** Hydraulische Schließeinheit

Die feste und bewegliche Platte sind mit Gewindebohrungen versehen, die zur Befestigung des Werkzeuges mittels Schrauben oder Spannwerkzeugen dienen. Die Mittelbohrung der Platten ist für die Zentrierung des Werkzeuges gedacht, was die richtige Position des Werkzeuges beim Einsetzen sicherstellt. Weitere Teile sind die Führungsstifte, die beide Spannplatten verbinden. Einerseits garantieren sie die Führung der beweglichen Platte beim Öffnen und Schließen und andererseits

ermöglichen Sie die Funktionsweise der Schließeinheit. Der Führungsstift muss so dimensioniert sein, dass er der maximal möglichen Spannkraft entspricht, die erreicht werden kann. Diese Kraft wird mit Hilfe des hydraulischen Zylinders entwickelt. Dank dieser Kraft kann man nach Bedarf die Schließeinheit während des Einspritzzyklus sehr genau bedienen.

Ein weiterer häufiger Typ der Schließeinheit ist die **Einheit mit Kniehebel-Mechanismus** (siehe Abb. 5.12). Diese Einheit benutzt man in elektrischen oder hybriden Maschinen. Der Kniehebel-Mechanismus wird aus zwei Säulen gebildet, die mit einem umdrehbaren Zapfen verbunden sind. Ein Ende ist an der festen Platte und das zweite an der beweglichen Platte befestigt. Wenn die Einheit geöffnet ist, stehen die Säulen in der Form des Buchstaben „V“. Im geschlossenen Zustand bilden sie eine Linie. Dieses System hat folgende Vorteile:

- wesentlich kleinere Betätigungskräfte des Mechanismus,
- hohe Geschwindigkeit der Bewegungen,
- bei Überlastung kommt es nicht zur Öffnung des Werkzeugs (sog. „Atmen“ des Werkzeugs),
- kleiner Energieverbrauch.



**Abb. 5.12** Kniehebel-Mechanismus-Schließeinheit

### Größe der Schließkraft des Werkzeugs

Die Schließkraft des Werkzeugs sollte genügend hoch sein, um das sogenannte „Atmen“ des Werkzeuges in der Anfangsphase zu verhindern. Zum „Atmen“ des Werkzeugs kommt es im Augenblick, wenn der Druck der Schmelze, die den

Werkzeughohlraum füllt, die Schließkraft überschreitet. Infolge dessen kommt es zum Eindringen der Schmelze in die Kontaktflächen beider Werkzeugteile und die Einspritzteile weisen eine *Gratbildungen* auf. Die Schließkraft sollte aber auch nicht zu groß sein, damit die Luft während der Füllung entweichen kann (sogenannte „Entlüftung“ des Werkzeugs), und es nicht zur Beschädigung („Druckstellen“) der Trennfläche des Werkzeugs kommt. Mit der richtigen Einstellung der Schließkraft wird die Füllung des Werkzeughohlraumes ohne das Verursachen einer Gratbildungen, sowie die lange Lebensdauer des Werkzeugs gesichert. Während des Einspritzzyklus ist es also notwendig die Kraft, mit der das Werkzeug geschlossen wird, einzustellen. Die nötigen Veränderungen bewegen sich in einem kleinen Bereich, doch ist es vorher nötig die wichtigen Parameter einzustellen um das Werkzeug zu schützen und Beschädigungen zu vermeiden. Bei einem gewöhnlichen Werkzeug beträgt diese Kraft zirka 5 kN, aber im Notfall kann diese auch auf zirka 25 kN erhöht werden.

### Einstellung der Schließkraft

Bei der erstmaligen Einstellung der Schließkraft, wenn die notwendigen Werte nicht bekannt sind, kann man diese nach einer einfachen Berechnung einschätzen. Diese Berechnung geht von der einfachen Regel aus, dass die Schließkraft ( $F_u$ ), von der Fläche der Projektion in der Trennfläche ( $S$ ) und dem Druck im Werkzeughohlraum ( $p_i$ ) abhängt. Weil der Druck vorher nicht bekannt ist, wird dieser durch die sogenannte spezifische Schließkraft – den Druck ( $p_s$ ) ersetzt, welcher je nach Material empfohlen wird, siehe die Gleichung (1). Für die Materialien PS, SB, SAN, ABS, PE-LD und a PE-HD beträgt den spezifischen Druck 2,5 kN/cm<sup>2</sup> bis 5 kN/cm<sup>2</sup>. Dagegen beträgt sie für die Materialien PMMA, PPO, PC PVC, PP, PA, POM, PET, PBT und PPS von 5 kN/cm<sup>2</sup> bis 7 kN/cm<sup>2</sup>.

$$S \cdot p_s \leq F_u \quad (1)$$

Diese Schließkraft stellt sich bei der erstmaligen Benutzung des Werkzeugs ein und muss je nach konkreter Anforderung weiter angepasst werden.

## Auswahl der Schließeinheit

Bei der Auswahl der richtigen Schließeinheit ist es notwendig folgende Faktoren abzuwägen:

- **die Größe des Werkzeugs**
  - ✓ Maße,
  - ✓ Zentrierring,
  - ✓ die Verbindung des Auswerfers,
  - ✓ das Gewicht,
- **die Fläche der Projektion des Einspritzteils in der Trennfläche** (die beeinflusst die Größe der Schließkraft),
- **die Wanddicke** (für die dünnwandige Erzeugnisse ist allgemein eine größere Kraft erforderlich).

Bei der Auswahl der Schließeinheit für ein bestimmtes Werkzeug sind auch andere konstruktionsmäßige Spezifikationen abzuwägen, z. B.:

- die maximale Öffnung des Werkzeugs,
- der Raum zwischen den Führungssäulen,
- der Hub des Auswerfers,
- der Zeitbedarf für das Aufspannen des Werkzeugs.

Die maximale Öffnung ist durch die Entfernung zwischen den Platten definiert. Es ist nicht nur notwendig die Werkzeughöhe, sondern auch den „Fahrweg“ des Auswerfers, den Herstellungsauswurf, beziehungsweise den Arbeitsraum des Greifarmes des Roboters für das Ablegen des Erzeugnisses auf das Transportband zu beachten.

### 5.3

## Herstellung eines Spritzgussteiles

Die Herstellung eines Spritzgussteiles besteht aus mehreren Vorgängen, wobei die Spritzgusstechnologie nur ein Teil davon ist. Vor dem Einspritzen gibt es einige wichtige Vorbereitungsschritte. Die Herstellung kann man aus dem Gesichtspunkt des Materialweges wie folgt anordnen:

- Transport des Granulats,
- Trocknen des Granulats,

- Transport des Granulats zur Maschine,
- Mischen des Granulats,
- Einspritzen,
- sowie die Schlussoperationen.

### **Transport des Materials**

Der Transport des Materials hängt von der benötigten Menge ab. Für den Fall, dass nur eine kleine Materialmenge benötigt wird, ist das Material in 20 kg bis 25 kg Säcken abgepackt. Die mittelgroße Abnahme wird mithilfe Oktabins realisiert. Diese Kartonverpackung auf einer Europalette hat gewöhnlich ein Gewicht von 400 kg bis 1000 kg. Bei einem größeren Materialbedarf wird das Granulat in einer Zisterne aufbewahrt. Es wird dann mithilfe eines Ansaugnapfes in das Außensilo transportiert.

### **Trocknung des Granulats**

Der Trocknungsschritt ist für die Stabilität des Einspritzens und die Einhaltung der Qualität der Teile sehr wichtig. Im Grunde sind alle Materialien außer PP, PE und PS hygroskopisch. Deshalb ist es notwendig diese vor der Verarbeitung gründlich zu trocknen. Gründlich trocknen bedeutet, dass der Wasserinhalt des Granulates auf den Wert der minimalen Restfeuchtigkeit gesenkt wird. Diese Werte werden vom Hersteller vorgeschrieben und bewegen sich für gewöhnlich um 0,2 %. Die Mehrheit der Materialien wird, bei unbeschädigter Originalverpackung, im vorgetrockneten Zustand geliefert, was einer Restfeuchtigkeit von 0,4 % entspricht. Deswegen ist es immer notwendig das Material vor der Verarbeitung zu Trocknen. In der industriellen Praxis werden meist auch nicht hygroskopische Materialien (PP, PE und PS), speziell zur Entfernung des Kondensats an der Oberfläche des Granulats (Präventivmaßnahme), vorgetrocknet.

Die Hersteller des Granulats empfehlen die Parameter des Trocknungsverfahrens, das heißt die Temperatur und Dauer der Trocknung. Die Temperatur ist durch ein Intervall definiert. Ist eine schnellere Trocknung erforderlich, wird geraten, Trocknungstemperaturen an der oberen Grenze des empfohlenen Temperaturintervalls zu wählen. Umgekehrt sollte man im Fall einer kleineren Materialabnahme aus der Trocknungseinrichtung eine Temperatur an der unteren Grenze des Intervalls benutzen. Einige Polymere lassen sich nur schwierig auf die geforderte Restfeuchtigkeit trocknen, dann wird es notwendig diese mit Hilfe von

stationären Heißlufttrocknungsanlagen (siehe Abb. 5.13) über eine längere Zeit zu trocknen. Beim längeren Trocknen besteht allerdings das Risiko der Beschädigung (Degradation) des Polymers oder seiner Additive. In solchen Fällen ist es vorteilhaft alternative Trocknungsverfahren zu benutzen, wie zum Beispiel das Trocknen unter Vakuum. In der Vakuumtrocknungsanlage erfolgt erst die Erwärmung des Granulats auf die gewünschte Temperatur mittels Heißluft (am häufigsten 80 °C) und danach setzt ein starker Unterdruck in der Größenordnung von 0,8 bar ein. Bei diesem Unterdruck beträgt der Siedepunkt des Wassers zirka 54 °C. Die Trocknung erfolgt schnell und schonend.



**Abb. 5.13** Stationäre Heißlufttrocknungseinrichtung

Im Fall, dass das Material nicht genügend vorgetrocknet wurde, kann eine zu große Restfeuchtigkeit zu technischen Komplikationen und zur Qualitätsminderung der Spritzteile führen. Zu möglichen technischen Komplikationen zählen:

- die erhöhte Dünflüssigkeit der Schmelze und damit die verbundene Gefahr der Bildung von überschüssigen Material,
- die Schwankung der Dosierungszeit,
- willkürliches Herausfließen der Schmelze aus der Düse (im Fall von offenen Düsen).

Die Qualitätsminderung des Teiles schließt folgende Gesichtspunkte ein:

- Feuchtigkeitsschmutzstreifen auf der Oberfläche,
- überschüssiges Material,
- Erstarrung des Materials infolge der Hydrolyse (nur bei einigen Materialien, speziell bei PBT und PA).

Wenn die benötigte Restfeuchtigkeit erreicht ist, wird das Material zur Spritzgießmaschine transportiert. Handelt es sich bei der Trocknung und der Hygroskopizität um den Diffusionsprozess, ist dieser Prozess umkehrbar und das Granulat muss innerhalb einer bestimmten Zeit verarbeitet werden.

**Tab. 5.1** Empfohlene technologische Parameter für ausgewählte Kunststoffe

Kunststoff	Schmelztemperatur [°C]	Werkzeugtemperatur [°C]	Einspritzdruck [bar]	Nachdruck [bar]	Staudruck [bar]
PS	250 - 300	20 - 60	600 - 1 400	300 - 800	60 - 90
SAN	200 - 260	40 - 80	650 - 1 600	350 - 900	40 - 80
ABS	210 - 270	50 - 85	650 - 1 600	350 - 900	40 - 80
PVC	160 - 180	20 - 60	1 000 - 1 600	400 - 900	40 - 80
PMMA	220 - 250	20 - 90	1 000 - 1 400	500 - 1 200	80 - 120
PC	290 - 320	85 - 120	1 000 - 1 600	600 - 1 300	80 - 120
PE	210 - 250	20 - 40	600 - 1 400	300 - 800	40 - 80
PP	210 - 290	20 - 60	800 - 1 400	500 - 1 000	60 - 90
PA 6	230 - 260	40 - 120	500 - 1 600	350 - 1 100	40 - 80
PA 6.6	270 - 310	20 - 120	500 - 1 600	350 - 1 100	40 - 80
POM	180 - 210	80 - 120	700 - 2 000	500 - 1 200	40 - 80
PET	260 - 290	20 - 140	800 - 1 500	500 - 1 200	80 - 120
PBT	230 - 270	20 - 60	800 - 1 500	500 - 1 200	80 - 120
PPS	300 - 360	60 - 200	750 - 1 500	500 - 1 200	40 - 80

### **Transport des Granulats zur Maschine**

Das trockene Granulat wird im Fall einer kleineren benötigten Menge entweder manuell, oder aus einer nebenstehenden Trockenanlage mit Hilfe des Saugnapfs zur Maschine befördert. Bei großvolumigen Trocknungsanlagen wird das Material pneumatisch zur Verarbeitung transportiert.

## Einspritzverfahren

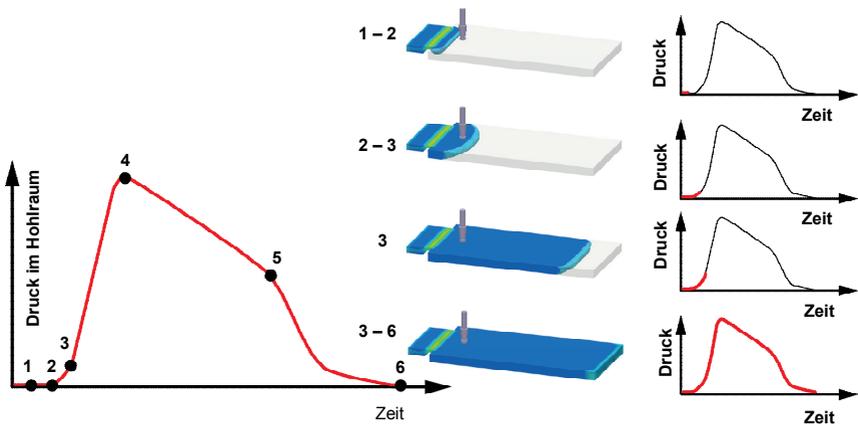
Das Einspritzverfahren wird über viele Parametern gesteuert, die sich in Abhängigkeit des einzuspritzenden Materials wesentlich unterscheiden (siehe Tab. 5.1). Die technologischen Parameter des Einspritzens und deren Einfluss auf die Qualität der Teile werden in Kapitel 5.4 beschrieben.

### 5.4

## Spritzgießparameter und ihr Einfluss auf die Qualität der Teile

Der Druck im Werkzeughohlraum hat einen entscheidenden Einfluss auf die Abmessungen und das Gewicht des Teiles. Darum ist es wichtig diesen Druck für jeden Einspritzzyklus gleichmäßig zu halten. Auf den Druck im Werkzeughohlraum hat eine ganze Reihe von Faktoren einen Einfluss, wie zum Beispiel:

- die Schmelztemperatur,
- die Viskosität der Schmelze,
- die Stabilität der Maschine,
- der Druckverlust im Angussystem usw.



**Abb. 5.14** Verlauf des Drucks im Werkzeughohlraum

Den *Druck im Werkzeughohlraum* kann man nur überwachen, wenn das Werkzeug mit den Drucksensoren ausgerüstet ist (siehe Abb. 5.14). Die Sensoren

offenbaren, dass der Druck im Werkzeughohlraum nur zirka 1/3 des Druckes beträgt, der im Zylinder auf die Schmelze einwirkt. Hinsichtlich der Qualität des Teiles, wäre es also vorteilhaft den Einspritzprozess (die Umschaltung auf dem Nachdruck) über den Druck im Werkzeughohlraum genau zu steuern. Fehlen die genannten Sensoren wird der Einspritzprozess mit Hilfe des Drucks in der Schmelzkammer gesteuert (z.B. System SPC der Firma Krauss Maffei). Dadurch werden sogenannte Druckspitzen ausgeschlossen, da die Umschaltung auf den Nachdruck bei Erreichen eingestellter Druckwerte durchgeführt wird. Diese Art der Umschaltung auf den Nachdruck ist optimal, garantiert einen konstanten Druck im Werkzeughohlraum und senkt den Einfluss negativer Faktoren (z. B. eine Änderung der Viskosität der Schmelze).

Der Druck im Werkzeughohlraum ist nicht konstant und wird durch die Drucklinie charakterisiert (siehe Abb. 5.14). Einige Parameter haben einen Einfluss auf diese Linie, die wichtigsten sind folgende:

- ***In der Einspritzphase***
  - ✓ die Einspritzgeschwindigkeit,
  - ✓ der Widerstand gegen Schmelzfluss,
  - ✓ die Temperatur der Schmelze,
  - ✓ die Werkzeugtemperatur.
- ***In der Nachdruckphase***
  - ✓ die Temperatur der Schmelze,
  - ✓ die Werkzeugtemperatur,
  - ✓ die Größe des Nachdruckes,
  - ✓ die Dauer des Nachdruckes.
- ***In Bezug auf den maximalen Druck im Hohlraum***
  - ✓ die Einspritzgeschwindigkeit,
  - ✓ die Temperatur der Schmelze,
  - ✓ der Punkt des Umschaltens auf den Nachdruck,
  - ✓ die Viskosität der Schmelze.

Der Verlauf der Drucklinie kann folgende Aspekte der Qualität des Teiles beeinflussen:

- ***In der Einspritzphase***
  - ✓ das Aussehen des Teils,
  - ✓ die Oberflächenqualität des Teils,

- ✓ die Orientierung der Makromoleküle,
- ✓ der Grad der Kristallinität.
- **In der Nachdruckphase**
  - ✓ die Gratbildung,
  - ✓ das Gewicht des Teils,
  - ✓ die Abmessungen des Teils,
  - ✓ der Schwund des Teils,
  - ✓ die Bildung der Lunken,
  - ✓ die Bildung von Einfallstellen.

Vom Gesichtspunkt der Spritzgießtechnologie selbst, wird die Qualität der Teile durch den Druck und die thermischen Zyklen im Werkzeughohlraum beeinflusst. Im idealen Fall wär der Druck und die Temperatur an jedem Punkt des Hohlraumes identisch. Dann gäbe es in den Einspritzteilen keine Innenspannung und die Teile würden keine Deformation aufweisen. Eine solche Gleichmäßigkeit bezüglich Druck und Temperatur ist jedoch nicht möglich, weil es bei der Füllung des Werkzeughohlraumes immer zu einer Drucksenkung aufgrund des Widerstandes gegen den Schmelzfluss kommt. Die Temperaturunterschiede entstehen durch die Abkühlung der Schmelze während der Füllung des Werkzeughohlraumes, auch wenn die Füllungszeit gewöhnlich recht kurz ist. Strebt man eine gleichmäßige Druck- und Temperaturverteilung im Werkzeughohlraum an, ist es notwendig den Widerstand gegen den Schmelzfluss weitestgehend zu verringern. Je kleiner der Widerstand ist, desto schneller erfolgt die Füllung des Werkzeughohlraumes. Die Druckunterschiede im Hohlraum werden dann, dank des kleineren Druckverlustes auch geringer. Dieser Faktor ist beim Werkzeugentwurf wichtig, speziell bezüglich der Wahl der Prozessparameter des Angussystems. Betreffend des Einflusses der Werkzeuggeometrie gilt für gewöhnlich, dass für das Erreichen eines kleineren Druckverlustes während der Füllung, das Angussystem von scharfen Kanten befreit und plötzliche Richtungsänderungen des Schmelzflusses ausgeschlossen werden sollten, weil diese Stellen wesentlich zu Druckverlusten beitragen. Hinsichtlich der Prozessparameter gilt, dass die Einspritzgeschwindigkeit und die Temperatur der Schmelze möglichst hoch sein sollten. Diese Parameter bewirken eine niedrige Viskosität, kleinere Druckverluste und eine kurze Füllungszeit des Werkzeughohlraumes. In der Realität unterliegen die technologischen Parameter

selbstverständlich Grenzen, welche im folgenden Abschnitt detailliert betrachtet werden.

Die Einspritzgeschwindigkeit kann man je nach Maschine auf einen Maximalwert erhöhen. Jedoch erhöht sich mit der Einspritzgeschwindigkeit gleichzeitig das Risiko von Oberflächenmängeln an den hergestellten Teilen. Eine sehr hohe Einspritzgeschwindigkeit wird als „*Jetting*“ (Freistrahlbildung), oder Füllung mit freiem Strahl der Schmelze bezeichnet. Falls die Konstruktion des Angussystems eine große Füllgeschwindigkeit nicht ermöglicht, sollte man die Einspritzgeschwindigkeit verringern.

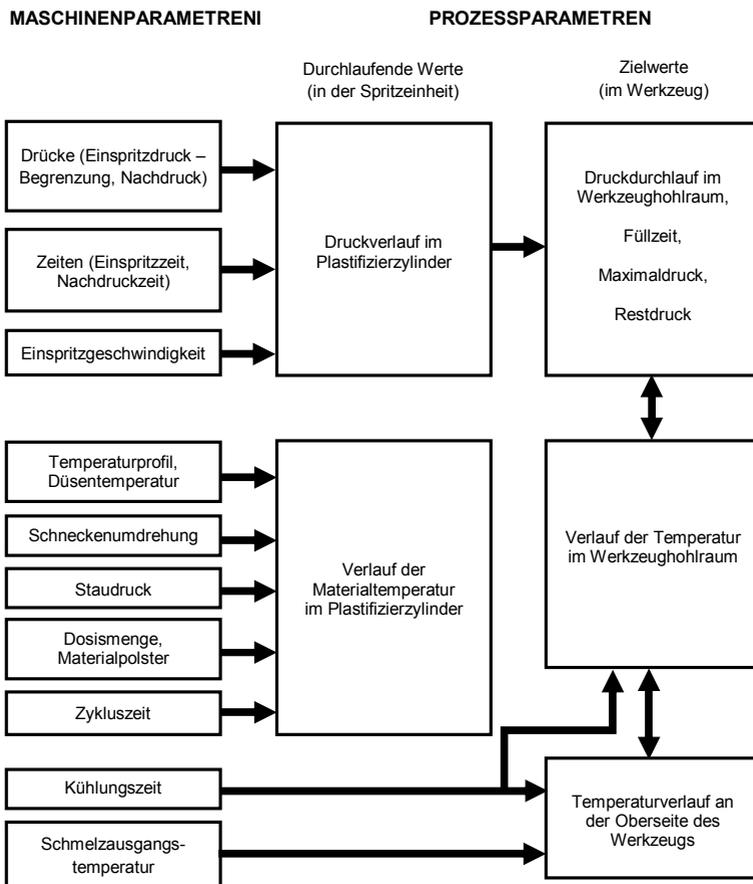


Abb. 5.15 Wichtige Prozessparameter die die Spritzgussqualität beeinflussen

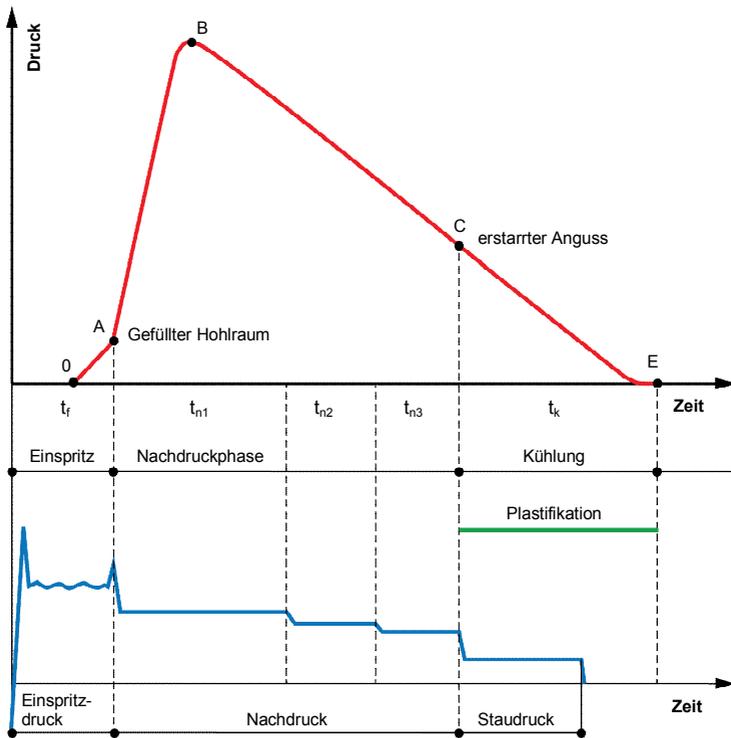
Ein weiteres Limit stellt die Temperatur der Schmelze dar. Sie sollte so hoch sein, dass keine thermische Zersetzung des Polymers stattfindet. Je empfindlicher das Polymer gegenüber der Temperatur ist, desto größer sollte die Differenz zur empfohlenen Temperaturobergrenze des Herstellers sein. Diese Differenz ist sinnvoll im Hinblick auf die Größe des Temperaturintervalls zu wählen. Eine niedrige Temperatur bewirkt das Gegenteil – eine größere Viskosität und einen höheren Druckverlust. Aufgrund der höheren Viskosität kommt es in der Schmelze zu einer großen inneren Reibung während des Flusses, was eine große Menge Wärme freisetzt. Das heißt, dass eine zu gering gewählte Temperatur in der Spritzeinheit zu einer hohen Temperatur des Materials während des Flusses führen kann.

Auch die Temperatur des Werkzeugs unterliegt bestimmten Grenzen, denn eine höhere Werkzeugtemperatur bedingt eine längere Kühlungszeit und im Ergebnis verlängert sich die Gesamtdauer des Einspritzzyklus. Die Werkzeugtemperatur wird deshalb so gewählt, dass die Anforderungen an die Qualität des Teiles erfüllt werden. Eine unnötige hohe Werkzeugtemperatur verursacht außerdem zusätzliche Kosten. In der Abbildung 5.15 ist die Zusammenfassung von wichtigen Parametern bezüglich der Qualität der Teile dargestellt.

### 5.4.1 Einspritzung und der Druck im Werkzeughohlraum

Im vorigen Abschnitt wurde erläutert, dass der Druckverlauf im Werkzeughohlraum einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Teile hat. In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen *Einspritzdruck* und dem *Druck im Werkzeughohlraum* beschrieben. Diese Kohärenz beeinflusst den Druckzyklus im Werkzeughohlraum während der Einspritzung und damit die Qualität des Teils.

Der hydraulische Druck (wirkt im Hydraulikzylinder – der Antrieb der Schnecke) und der spezifische Druck (wirkt auf die Schmelze vor der Schneckenstirn) sind während der Einspritzung im Grunde identisch, wenn man die Verluste durch Reibung bei der Schneckenbewegung vernachlässigt. Dagegen ist der Druck im Werkzeughohlraum durch die Druckverluste wesentlich geringer und hängt von der Viskosität der Schmelze, der Einspritzgeschwindigkeit und der Konstruktion des Angussystems ab. In der Abbildung 5.16 ist der Einspritzdruck und der Druckverlauf im Werkzeughohlraum dargestellt.



**Abb. 5.16** Druckverlauf im Werkzeughohlraum (oben) und in der Spritzgussmaschine (unten)

0-A: dynamische Phase der Füllung; A-B: Kompressionsphase der Füllung;  
 B-C: Nachdruckphase; C-E: Kühlungsphase (gesamtes Volumen des Kunststoffes ist erstarrt,  
 gekühlt wird bis zu einer Temperatur, die für das Abformen geeignet ist);  $t_f$ : Einspritzzeit;  
 $t_{n1-3}$ : Zeiten des profilierten Nachdrucks;  $t_k$ : Kühlungsrestzeit (nach dem Nachdruck)

In der Abbildung 5.16 ist zudem ersichtlich, dass der Druck im Werkzeughohlraum mit einer gewissen Verzögerung auf den Einspritzdruck reagiert. Bei Punkt A ist der Hohlraum volumenmäßig ausgefüllt. Zwischen den Punkten A und B wird der Druck bis zum Maximaldruck erhöht, um die Schmelze im Werkzeughohlraum zu verdichten. Auch wenn sich der Einspritzdruck nicht ändert, sinkt der Druck im Werkzeughohlraum langsam infolge der Schwindung bis Punkt C. Ab diesem Punkt sinkt der Druck schneller, weil der gesamte Kunststoff erstarrt ist und der Druck der Nachdruckphase keinen Einfluss mehr auf den Druck im Hohlraum hat. Der Druck

sinkt stufenweise bis zur Werkzeugöffnung. Der Druck, der in der Werkzeugöffnung verbleibt, wird Restdruck genannt.

## 5.4.2 Einspritzdruck, Nachdruck, Einspritzzeit und Nachdruckzeit

Die Höhe von *Einspritzdruck* und *Nachdruck* soll so gewählt werden, dass eine genügend schnelle und wirksame Füllung des Werkzeughohlraumes ermöglicht wird. Auf der anderen Seite sollte der Nachdruck nicht zu hoch sein, damit die Teile keinem unangemessen hohen Restdruck ausgeliefert werden, der zu einer großen Innenspannung während der Einspritzung und folgend zur Deformation führt. Bei amorphen Thermoplasten wird die Anwendung eines geringeren Nachdrucks empfohlen, um Teile mit einer möglichst kleinen Innenspannung zu gewinnen. Bei hoher Innenspannung weisen die Teile eine wesentliche Zerbrechlichkeit speziell im Gebiet der Angüsse auf. Zusätzlich zum Einfluss des Nachdruckes ist die Schwindung des Materials in der Erstarrungsphase der Schmelze zu beachten, welche Probleme bei der Formtrennung der Teile verursachen kann. Bei semikristallinen Kunststoffen ist es vorteilhaft, für eine ausreichend lange Zeit einen stabilen Nachdruck zu halten, um den Prozess der Kristallisierung des Materials zu garantieren.

Die *Dauer des Einspritzdrucks* (d. h. Dauer der Einspritzung und des Nachdrucks) sollte so gewählt sein, dass es in dieser Zeit zur Erstarrung des Materials im Anguss kommt. Wenn die Nachdruckzeit zu kurz ist, könnte die Schmelze aus dem Werkzeughohlraum ins Angussystem zurückfließen. Dies führt zu Einfallstellen und Maßabweichungen des Teils. Eine zu lange Nachdruckzeit dagegen (eine Zeit, die die Erstarrung des Angusses überschreitet) ist nicht effektiv, verlängert lediglich den Einspritzzyklus und führt im Angussgebiet zu einer erhöhten Innenspannung. Die richtige Länge der Nachdruckzeit hängt vom Erzeugnis ab. Für Teile mit hohen optischen Anforderungen, bei denen eine erstklassige Oberflächenqualität gefordert wird, wird die Nachdruckzeit durch die Zeit bestimmt, ab der die Oberfläche keine Einfallstellen mehr aufweist. Bei anderen Teilen, speziell bei Hochfesten Teilen, bestimmt man die richtige Nachdruckzeit mithilfe des Gewichtes. Bei der Nachdruckzeit, die der Angusserstarrung entspricht (oder länger), bleibt das Gewicht des Teiles gleich (erhöht sich nicht). Dagegen sinkt das Gewicht des Teiles bei einer kürzeren Nachdruckzeit.

### Einspritzgeschwindigkeit

Die Einspritzgeschwindigkeit sollte so groß sein, dass der Werkzeughohlraum möglichst schnell, bei minimaler Temperatur und mit geringem Druckverlust mit der Kunststoffschmelze gefüllt wird. Gleichzeitig sollte es nicht zum „Jetting“ (Freistrahlbildung) kommen. Bei dünnwandigen Teilen verwendet man eine größere Einspritzgeschwindigkeit als bei dickwandigen Teilen, um eine gleichmäßige Füllung des Werkzeughohlraumes zu erreichen. Eine niedrige Füllgeschwindigkeit hat große Temperaturunterschiede bezüglich Angussgebiet und fernerer Partien zur Folge. Die erhöhte Viskosität der abgekühlten Schmelze erfordert größere Einspritzdrücke, was große Ansprüche an die Schließkraft des Werkzeugs stellt.

Eine zu hohe Einspritzgeschwindigkeit verursacht eine große Schergeschwindigkeit zwischen der erstarrten Oberflächenschicht und dem plastischen Kern. Die Scherbeanspruchung kann im extremen Fall zur Beschädigung (Degradation) des Polymers führen. Diese Beschädigung tritt häufig am Angussystem auf oder wenn der Schmelzfluss eine plötzliche Änderung des Teilquerschnitts im Werkzeughohlraum erfährt. Besonders gefährdet ist der Punktanguss, in welchem die Schergeschwindigkeit stark ansteigt. Die dadurch verursachte erhöhte Innenreibung des Polymers kann zur thermischen Zersetzung führen. Im konkreten Fall hängt dies vom Polymertyp ab. PP und PA, zum Beispiel, vertragen die Scherbeanspruchung sehr gut, dagegen sind PMMA und PC Materialien, die empfindlich auf die Scherbeanspruchung reagieren.

Bei hohen Einspritzgeschwindigkeiten ist eine wirksame Entlüftung des Werkzeughohlraumes besonders wichtig. Ohne die Entlüftung kann die im Werkzeughohlraum eingeschlossene Luft während der Einspritzung nicht entweichen und wird im Werkzeug komprimiert. Komprimierte Luft erwärmt sich stark, was zur thermischen Beschädigung der Schmelze (im direkten Kontakt mit der heißen Luft) führt. Diese Erscheinung wird „Dieseleffekt“ (Lufteinschlüsse) genannt. Für die richtige Einstellung der Einspritzgeschwindigkeit gibt es einige Empfehlungen, die jedoch für hochwertige Teile individuell sind und auch immer von dem konkreten Kunststofftyp, der Konstruktion des Teils sowie der Konstruktion des Spritzgusswerkzeugs abhängen. Die empfohlenen Werte bezüglich der Einspritzgeschwindigkeit übermittelt der Hersteller im Materialblatt oder technologischen Blatt.

### **Orientierungseffekt der Makromoleküle durch den Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit**

Bei der Füllung des Werkzeughohlräumens kann der Orientierungseffekt aufgrund der Innenreibung der Makromoleküle auftreten. Makromoleküle, die in der Schmelze eine zufällige Position einnehmen, werden durch die Scherbeanspruchung in Richtung der Fluss ausgerichtet. Die Orientierung der Makromoleküle führt zu einer ungleichmäßigen Schwindung des Materials und zu anisotropen Eigenschaften des gespritzten Kunststoffes. Je größer die Schergeschwindigkeit ist, desto größer ist die Orientierung der Makromoleküle. Das heißt, dass höhere Einspritzgeschwindigkeiten eine größere Orientierung der Makromoleküle verursachen. Diesen Effekt kann man mit einer höheren Temperatur der Schmelze und einer höheren Werkzeugtemperatur abschwächen, da diese die Relaxation der Makromoleküle in der Kunststoffschmelze nach Abschluss der Füllung des Werkzeughohlräumens unterstützen. Wenn sich die Orientierung der Makromoleküle verringert, werden auch ihre negativen Wirkungen eliminiert (Innenspannung des Teils, sowie die Anisotropie der Eigenschaften). Darum ist es für die Verringerung der Orientierung der Makromoleküle empfehlenswert, wenn der Prozess es erlaubt, eine höhere Temperatur der Schmelze und eine höhere Werkzeugtemperatur zu wählen, und erst danach die Einspritzgeschwindigkeit senken.

### **5.4.3 Plastifizierung des Materials**

#### **Temperatur der Schmelze**

Die Temperatur der Schmelze ist der technologische Parameter, der für jedes Material spezifisch ist. Bei der Plastifizierung wird das Granulat geschmolzen und auf eine definierte Temperatur der Schmelze erwärmt, welche im Idealfall im ganzen Volumen der Dosis homogen ist. Diese Temperatur der Schmelze wird auf den ersten Blick über das Temperaturprofil des Zylinders der Spritzgießmaschine eingestellt. Jedoch haben mehrere Faktoren Einfluss auf diese Temperatur. Zu diesen zählen:

- die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke,
- der Staudruck bei der Dosierung,
- die Verweilzeit des Materials im Zylinder.

Die Temperatur der Schmelze ändert sich nach dem Verlassen der Spritzeinheit, vor allem infolge:

- der Reibung des Materials in der Einspritzphase,
- der Werkzeugtemperatur.

Bei einer zu niedrigen Temperatur der Schmelze kann bei gespritzten Teilen das Problem in Form von nicht aufgeschmolzenen Teilchen eintreten. Bei zu hoher Temperatur der Schmelze tritt die thermische Zersetzung des Materials ein. Natürlich würde die Einstellung niedriger Werte in der Schmelzkammer eine niedrigere Temperatur der Schmelze im Werkzeughohlraum bedeuten. Die starke Reibung im Material aufgrund der höheren Viskosität der Schmelze, führt allerdings zu einer heftigen Erhöhung der Temperatur und verursacht paradoxerweise auch eine lokale thermische Beschädigung des Materials.

### **Temperatur des Plastifizierzylinders**

Die Einstellung der Temperatur der Schmelze, mittels der Heizelemente des Plastifizierzylinders der Spritzgussmaschine sollte nach der Empfehlung der Hersteller erfolgen. Der Hersteller empfiehlt ein bestimmtes Temperaturintervall. Die Temperatur bezieht sich in diesem Intervall auf das erste Heizungsband der Kammer auf der Seite der Düse. Sollte das Temperaturintervall nicht bekannt sein, kann man die Literaturwerte für einzelne Polymertypen benutzen. Die Temperatur des Heizungsbandes entspricht der Innenwandtemperatur des Zylinders, beziehungsweise der Temperatur an der Stelle des Temperatursensors. Wenn man die Wärmeentwicklung durch Reibung beim Plastizieren vernachlässigt, erreicht die Schmelze die gewünschte Temperatur nach relativ langer Zeit. Dank der Reibung des Materials erfolgt die Erwärmung relativ schnell. Die Geschwindigkeit der Erwärmung erhöht sich mit steigendem Staudruck, sowie mit der Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit in der Plastifikationsphase des Materials. Bei Änderung dieser Parameter ist es deshalb wichtig, deren Einfluss auf die Schmelztemperatur zu berücksichtigen. Die Temperaturen der weiteren Heizungsbander sollten sich in Richtung des Einfülltrichters verringern. Für die oft verwendeten Thermoplaste beträgt der ideale Unterschied zwischen den Temperaturen des ersten und letzten Heizungsbandes 20 °C bis 30 °C. Für das Material PA 6.6 kann für das Plastifizieren ein kleinerer Temperaturunterschied gewählt werden. Die Temperatur am Ausgang des Einfülltrichters hin zur Transportzone der Schnecke sollte relativ gering gehalten

werden. Deshalb ist diese Stelle des Granulateingangs mit Kühlungskanälen versehen, die eine Temperatur von 30 °C bis 40 °C gewährleisten. Ein vorzeitiges Schmelzen des Granulats würde die weitere Bewegung hin zur Schmelzkammer hemmen. Diese Temperatur sollte auch nicht zu klein sein, um die Bildung von Wasserkondensat zu verhindern. Die Kühlung unter dem Einfülltrichter ist besonders für Polymethylmethacrylate (PMMA) wichtig, die empfindlich auf vorzeitiges Schmelzen sind.

### **Düsentemperatur**

Die Temperatur der Einspritzdüse ist für die einfache Strömung der Schmelze durch die Düse in den Werkzeughohlraum in der Phase der Einspritzung und des Nachdrucks wichtig. Sie sollte auf eine Temperatur entsprechend des letzten Heizbandes der Schmelzkammer eingestellt sein. Je nach Materialbedarf und der Notwendigkeit der Kompensierung thermischer Verluste durch den Kontakt der Düse mit dem kühleren Werkzeug, kann sie auch etwas höher oder niedriger sein. Die Düsentemperatur ist auf kleinen und mittel bis großen Spritzgießmaschinen im Grunde mit der Temperatur des Zylinders an dem sie befestigt ist identisch, da die maßspezifische thermische Kapazität der Düse im Vergleich mit dem Zylinder sehr gering ist.

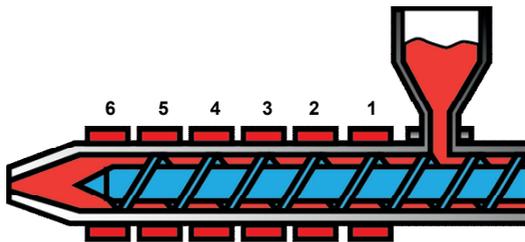
Ist die Düse mit einem Thermofühler ausgerüstet (die Standardausführung), lässt sich die optimale Temperatur einfach bestimmen. Es handelt sich im Grunde um die Temperatur, die sich während des Einspritzzyklus durch den Einfluss des Schmelzdurchflusses, auch trotz thermischer Verluste beim Kontakt mit dem Werkzeug nicht ändert. Eine zu hohe Düsentemperatur wird beim Kontakt mit dem Werkzeug gesenkt und eine zu geringe Temperatur wird durch die Schmelze erhöht. Aus technologischen Gründen ist die Einstellung einer niedrigeren Düsentemperatur besser, hauptsächlich im Fall der offenen Düsen. Man verhindert damit ein Herausfließen des Materials aus der Düse und das damit verbundene Schwankungen durch sogenannten „Materialpolster“ nicht auftreten.

### **Thermisches Profil des Plastifizierzylinders**

Wie schon erklärt wurde, richtet sich die Temperatur des Plastifizierzylinders der Spritzgießmaschine nach dem zu verarbeitendem Material, der Zykluszeit, der Platzierung des Heizbandes und der konkrete Geometrie der Schnecke. Die

Einstellung der einzelnen Heizzonen erfolgt nach dem sogenannten Thermoprofil. Allgemein existieren vier Typen an Thermoprofilen, Beispiele sind in der Abbildung 5.17 ausgeführt:

- flach,
- steigend,
- Sinkend,
- steigend mit einer Senkung bezüglich der Düse.



Heizungszone	6	5	4	3	2	1	
Eingestellte Temperatur [°C]	280	280	280	280	280	280	- flach
	280	275	270	260	250	240	- steigend
	280	280	285	290	295	300	- sinkend
	270	280	270	260	250	240	- steigend mit einer Senkung bezüglich der Düse

Abb. 5.17 Beispiele der Thermoprofile der Plastifizierzylinder

### Das flache Thermoprofil

Dieses Thermoprofil mit konstanter Temperatur auf allen Heizbändern inbegriffen der Düse ist vorteilhaft bei kurze Zyklen mit der Anwendung einer großen oder maximalen Einspritzkapazität. Der Vorteil dieses Profils besteht in einer großen thermischen Homogenität der Schmelze und der Zuverlässigkeit der Schmelzung des Granulats. Das flache Profil ist auch für die Verarbeitung von Kunststoffen mit Glasfasern geeignet, mit dem Ziel die Abnutzung der Schnecke und der Schmelzkammer zu senken.

### Steigendes Thermoprofil

Das steigende Thermoprofil ist in der Praxis am häufigsten vertreten. Der Temperaturgradient ist am höchsten und beträgt 20 °C bis 30 °C, kann aber je nach

Material und Zykluslänge auch größer sein. Dieses Profil wird bevorzugt für thermisch empfindliche Materialien, wie z. B. POM und PVC eingesetzt.

### ***Sinkendes Thermoprofil***

Es handelt um ein spezielles Thermoprofil, welches für die Drei-Zonen-Schnecke nur in speziellen Fällen und hauptsächlich bei der Verarbeitung des Materials PA 6.6 genutzt wird. Für die Barrierschnecke handelt es sich um die Standardeinstellung, um deren richtige Funktion zu garantieren.

### ***Steigendes Thermoprofil mit einer Senkung bezüglich der Düse***

Dieses Thermoprofil benutzt man gewöhnlich bei geöffneten Düsen für die Verhinderung von Fasern am Anguss und gegen das Herausfließen der Schmelze aus der Düse. Bei einer zu geringen Temperatur der Düse droht die Erstarrung des Materials in der Düse, beziehungsweise die Einspritzung des teilweise erstarrten Materials ins Werkzeug.

Die Auswahl eines bestimmten Thermoprofils ist von einer ganzen Reihe an Faktoren abhängig. Die günstigste Einstellung lässt sich mit praktischen Erfahrungen zu dem bestimmten Typ des Materials erreichen.

### **Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke**

Die Geschwindigkeit des Plastifizierens (die Schaffung der neuen Dosis) hängt von den Umdrehungen der Schnecke ab. Ein guter Parameter um die Geschwindigkeit der Umdrehung der Schnecke zu beschreiben ist die Umfangsgeschwindigkeit. Die Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke ist eng verbunden mit der Reibung im Material während seiner Plastifizierung. Die Materialhersteller empfehlen zwar eine optimale Umfangsgeschwindigkeit oder Schneckenumdrehungen, bezüglich der verschiedenen Schneckendurchmesser können sich deren Umfangsgeschwindigkeiten wesentlich unterscheiden. Die optimale Umfangsgeschwindigkeit ist diese, bei der die Schmelze homogen ist und nicht durch übermäßige Reibung beschädigt wird (und das thermisch, wie mechanisch). Eine zu hohe Umfangsgeschwindigkeit verursacht nicht zwingend eine ausreichende Homogenität des Materials. Bei der Verarbeitung eines Kunststoffes mit Glasfasern findet auch eine wesentliche Abnutzung der Schnecke und des Zylinders statt.

Für den Fall, das die gesamte Zykluszeit durch die Kühldauer nicht beeinflusst wird, aber die Dauer der Plastifizierung eine Verkürzung der Zykluszeit fördert, sollte

man die Schneckenumfangsgeschwindigkeit wesentlich erhöhen. Besser wäre es die Herstellung mit einer Maschine mit größerem Schneekendurchmesser durchzuführen, bei der die Plastifizierung mithilfe einer niedrigeren Umfangsgeschwindigkeit möglich wäre.

In der industriellen Praxis wird die Zeit der Plastifizierung und die damit verbundene Schneckenumfangsgeschwindigkeit der Kühlzeit angepasst. Beziehungsweise besteht das Anliegen darin, dass die Zeit der Plastifizierung die Kühlungszeit nicht überzuschreitet und so die Gesamtzykluszeit nicht verlängert. Sollte die Kühlzeit sehr lang sein und die Dosis des Materials (bei kurzer Plastifizierung) lediglich lange im Zylinder verbleiben, ist vor der Phase der Plastifizierung eine entsprechende Verweilzeit einzustellen.

### **Staudruck**

Der Staudruck bei der Plastifizierung des Materials ist ein wichtiger technologischer Parameter, der die Durchmischung (Homogenität) der Schmelze sichert. Diese Vermischung ist für das Erreichen einer hohen thermischen Homogenität wichtig. Gleichzeitig ist die Anwesenheit von Luft oder Gasblasen in der Materialdosis zu vermeiden. Das Niveau des Staudrucks hängt von der Viskosität der Schmelze und ihrer Wärmebeständigkeit ab. Der Staudruck ist speziell bei Materialien, die farbige Pigmente enthalten, wichtig. Da der Staudruck die Dispergierung des Pigments in der Schmelze begünstigt. Der Staudruck wird nach den empfohlenen Werten des Materialherstellers gewöhnlich in einem Intervall von 0 bar bis 100 bar eingestellt. Bei einem sehr geringen Staudruck können Luftblasen in den Teilen erscheinen (speziell bei der Plastifizierung einer großen Materialdosis) und bei Farbmaterialien auch farbige Streifen. Durch eine Erhöhung des Staudruckes, verlängert sich die Zeit der Plastifizierung (Dosierung) des Materials. Damit erhöhen sich auch die Innenreibung und die Erwärmung. Wenn der Staudruck zu hoch ist, kommt es zu Problemen bei der Bereitstellung einer neuen Materialdosis (Plastifizierung) und das Risiko der thermischen Degradation ist wesentlich höher.

#### **5.4.4 Der Umschaltpunkt**

Der Umschaltpunkt ist die Position, welche die Einspritzphase beendet und gleichzeitig den Beginn der Nachdruckphase darstellt. Die Wahl dieses Zeitpunktes

ist für die Einstellung der richtigen Füllmenge der Kunststoffschmelze im Werkzeughohlraum entscheidend, da dieser Einfluss auf den Druck der Schmelze hat (siehe vorangegangenes Kapitel). Es gibt verschiedene Arten der Umschaltung des Einspritzdruckes:

- nach Schneckenposition,
- nach hydraulischem Druck,
- nach dem Druck im Werkzeughohlraum,
- nach der Zeit.

*Die Umschaltung nach Schneckenposition* ist in der Praxis am häufigsten vertreten. Die Position wird in der Einheit Millimeter angegeben. Die Schneckenbewegung steuert die Einspritzgeschwindigkeit, welche bei Feststellung der Geschwindigkeitsabnahme automatisch mit dem Nachdruck versucht diese zu halten. Z. B. wenn die Dosis (Entfernung der Schnecke von der Düse) 100 mm beträgt und der Umschaltungspunkt 20 mm vor Düsenende bestimmt wurde, wird mit der Hilfe der Einspritzung durch die axiale Schneckenbewegung nach vorn die Schmelze im Werkzeughohlraum entsprechend des Schneckenwegs um 80 mm transportiert und danach, die letzten 20 mm auf Nachdruck umgeschaltet. Dabei wird weiterhin Schmelze in das Werkzeug transportiert, sodass die 100 % Füllung des Hohlraumes gesichert und gleichzeitig die Schwindung durch Erstarrung kompensiert wird. Nach dem Erreichen eines Endpunktes des Nachdruckes stoppt die Schnecke auf einer bestimmten Nullposition (z. B. 7 mm vor der Düse), sodass noch eine bestimmte Menge der Schmelze, ein sogenanntes „Materialpolster“, vorhanden ist. Dieses ist eine wichtige Angabe für die Stabilität des Produktionszyklus. Es ist möglich, absolute Einheit für die Schneckenpositionsbestimmung zu benutzen. In manchen Fällen ist die Dosis, also das Materialpolster, in der Einheit  $\text{cm}^3$ , maßgebend, um die Position des Umschaltungspunktes zu beurteilen.

*Die Umschaltung nach dem hydraulischen Druck* ist eine nicht weit verbreitete Art um diese zwischen Einspritzung und Nachdruck zu steuern. Dabei wird mittels hydraulischen Drucks, in der Einheit bar, eine bestimmte Grenze des hydraulischen Druckes festgestellt. Beim Erreichen schaltet die Schnecke in den eingestellten Nachdruck um. Der Nachteil dieser Art ist, dass der hydraulische Druck und der Druck im Werkzeughohlraum sehr unterschiedlich sein können, wobei die Qualität negativ beeinflusst wird.

**Die Umschaltung nach dem Druck im Werkzeughohlraum** ist eine sehr präzise Methode. Sie benötigt Drucksensoren im Werkzeughohlraum (ideale Platzierung ist ca.  $\frac{1}{3}$  des Fließwegs). Wie im vorhergegangenen Fall wird eine Druckgrenze eingestellt und nach dem Erreichen auf Nachdruck umgeschaltet. Der Vorteil ist, dass der Werkzeughohlraum in gleichen Druckzyklen gefüllt wird, was für die Stabilität des Prozesses und damit positiv auf die Wiederholbarkeit wirkt.

**Die Umschaltung nach der Zeit** ist technisch die einfachste, aber gleichzeitig die ungenaueste Methode. In diesem Fall wird die Dauer in Sekunden genutzt. In der Praxis wird diese Methode relativ wenig verwendet, was angesichts der schlechten Prozessstabilität zu Grunde liegt.

Ohne Rücksicht auf die genannten Methoden der Umschaltung wird empfohlen, den Nachdruck im Augenblick einer Füllung des Werkzeughohlraumes von 95 % bis 98 % einzuleiten. Bei der Inbetriebnahme eines neuen Werkzeuges wird der Nachdruck ausgeschaltet. Der Umschaltpunkt stellt sich auf Werte von 50 % bis 65 % ein. Dank des ausgeschalteten Nachdruckes wird die Schmelze genau in der Position vom Umschaltpunkt gehalten. Danach wird dieser stufenweise bis zur optimalen Position eingestellt. Nun wird der Nachdruck eingeschaltet und bis zu einem Materialpolster der Größe 3 mm bis 10 mm des Schneckenwegs gehalten (in Abhängigkeit zum Schneckendurchmesser). Wenn das Polster verkleinert oder vergrößert wird, verschiebt man, entsprechend der Methode um ähnliche Werte, den Umschaltpunkt. Dieser Vorgang wird in der Praxis u. a. als „technologische Einspritzung“, „Füllstudie“, oder „Grundprüfung“ bezeichnet.

### 5.4.5 Der Nachdruck

Wie oben aufgeführt beginnt die Nachdruckphase nach dem Umschaltpunkt. In dieser Phase hält die Schnecke den eingestellten Druck. Anfangs sichert der Nachdruck die vollständige Füllung des Werkzeughohlraumes mit Kunststoffschmelze. Nachfolgend wird die Schwindung der Schmelze während der Kühlung und der Erstarrung kompensiert. Die Nachdruckeinstellung wird durch zwei Parameter, die Druckhöhe und die Nachdruckzeit, gesteuert. Der Anfangsdruck wird allgemein in Höhe von  $\frac{2}{3}$  des Einspritzdruckes gewählt. Danach kann dieser entweder während der gesamten Nachdruckzeit konstant oder abgesenkt werden. Im

Fall der Herstellung von Sichtteilen oder Werkstücken mit minimalen inneren Eigenspannungen wird ein kleiner Druck in der Nachdruckphase von ca. 1/4 des Einspritzdruckes eingestellt. Nach Erreichen des Umschaltpunktes erhöht man den Druck stufenweise bis zu dem Zeitpunkt, wo die Teile keine Einfallstellen mehr aufweisen. Die Nachdruckzeit ( $t_n$ ) ist von den Wanddicken der Teile stark abhängig. Für Wanddicken ( $s$ ) von 1 mm bis 4 mm gilt die empirische Formel (2):

$$t_n = 0,3 \cdot s \cdot (1 + 2 \cdot s) \quad [s] \quad (2)$$

Die Gleichung (2) gilt für die Einspritzung für Temperaturen bis 60 °C. Bei höheren Temperaturen wird die Nachdruckzeit um ca. 30 % verlängert. In der Praxis wird diese am häufigsten nach Sichtmängeln eingestellt – Einfallstellen auf dem Bauteil. Bei kurzem Nachdruck entstehen oft Einfallstellen in der Umgebung der Angüsse, welche sich durch stufenweise Verlängerung der Nachdruckzeit vermeiden lassen. Den längsten effektiven Nachdruck kann man durch die Axialbewegung der Schnecke erfassen. Der Nachdruck ist nur durch Vorwärtsbewegung der Schnecke effektiv. Aus diesem Grund ist im Augenblick des Schnecken-Anhaltens, weiterer Nachdruck nicht erforderlich, da das Material erstarrt.

### 5.4.6 Die Werkzeugtemperatur

Die Werkzeugtemperatur ist der Parameter, welcher markant die Qualität des Produktes und die Herstellungskosten beeinflusst. Aus Sicht der Qualität des Teils ist eine höhere Werkzeugtemperatur günstiger, was hauptsächlich auf semikristalline Materialien zutrifft. Höhere Werkzeugtemperaturen haben Auswirkungen auf:

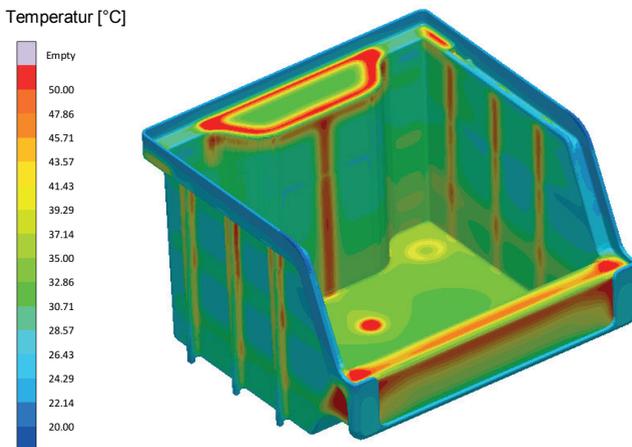
- niedrigere Druckverluste bei der Füllung des Werkzeughohlraumes,
- hochwertigere Materialstrukturen (größerer Anteil Kristallinität),
- höhere Oberflächenqualität (Glanz),
- kleinere Orientierung der Makromoleküle und damit kleinere Innenspannung, Anisotropie des Angussteiles,
- kleinere Orientierung bei Faserfüllungen,
- Maßhaltigkeit (geringere Schwindungen des Materials),
- kleineres Risiko bei der Bildung von Fließnähten.

Die Werkzeugtemperatur ist der technologische Parameter, der vom Hersteller des Materials im Materialdatenblatt empfohlen wird und in den meisten Fällen in einem Temperaturbereich aufgeführt wird. Die untere Grenze wird hauptsächlich durch die Flusseigenschaften beim Schmelzen festgestellt und bestimmt den Kristallinitätsgrad (bei teilkristallinen Kunststoffen) und damit die Qualität der Teiloberflächen. Dagegen hat die obere Grenze, die maximale Temperatur, Einfluss auf das Abformen des Produktes. Für amorphe Thermoplaste ist diese 10 °C unter der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ). Eine höhere Werkzeugtemperatur bedingt eine langsame Kühlung, was zur Verlängerung der Kühlungszeit und damit zur Erhöhung der Herstelldauer der Produkte führt. Die Wahl der Werkzeugtemperatur ist damit eine Wahl zwischen höherer Qualität des Produkts oder niedrigeren Herstellungskosten infolge der Fertigungsdauer. Es wird ein Kompromiss gewählt, der die entsprechende Qualität bei ökonomisch akzeptablen Herstellungskosten sichert.

Die Werkzeugtemperatur wird mittels Temperierungsgerät eingestellt. Dieses wird mit einem Temperiermedium, wie z. B. Wasser, wärmeübertragenden Öl oder Glykol, welches durch Kanäle im Werkzeug zirkuliert, erhitzt oder gekühlt. Der Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausgang am Werkzeug sollte maximal 5 °C betragen. Im Fall von Wasser werden gewöhnlich Temperaturen zwischen 20 °C und 95 °C eingestellt. Bei Temperaturen über 100 °C benutzt man Temperierungseinheiten, welche mit höherem Druck arbeiten, da der Punkt des Siedens nicht erreicht werden soll. Hierbei können Werkzeugtemperaturen bis 140 °C, in außergewöhnlichen Fällen sogar bis 160 °C, realisiert werden. Umgekehrt ist die niedrigste Temperatur am Eintritt in das Werkzeug durch die spezifischen Eigenschaften des Kühlwassers gegeben. Bei Bedarf von intensiver Kühlung nutzt man im Werkzeug das sogenannte Systemwasser (Wasser aus der Zentralkühlungseinrichtung) mit einer Temperatur von ca. 13 °C. Bei der Kühlung mit der Hilfe vom Systemwasser ist es immer notwendig, den Taupunkt der Umgebung zu beobachten. Die Bildung von Kondensat auf der Werkzeuoberfläche sollte vermieden werden. Im Fall der Temperierung der Werkzeuge mit der Hilfe von wärmeübertragenden Öl können die Temperaturen im Bereich von 30 °C bis 250 °C genutzt werden, allerdings wird es in den meisten Fällen erst ab 95 °C eingesetzt. Für die Temperaturregulation ist Öl weniger geeignet als Wassers mit kleinerer spezifischer Wärmekapazität. Öl benutzt man vorrangig für Werkzeuge bei hoher

Arbeitstemperatur, z. B. für die Einspritzung einiger Hochleistungspolymere, wie PPSU, PI oder PES, wo die Werkzeugtemperatur ca. 160 °C betragen sollte, siehe Tab. 3.4b.

Die reale Temperatur beim Einspritzzyklus auf der Werkzeugoberfläche ist höher und schwankt in bestimmten Bereichen, was von der Schmelztemperatur und der Zykluszeit abhängt. Weiterhin ist die Temperatur im Werkzeug inhomogen (siehe Abbildung 5.18). Diese lokalen Temperaturunterschiede beeinflussen die Schwindung des Bauteils und bewirken eine damit verbundene Deformation. Die Gleichmäßigkeit der Temperaturen im Hohlraum wird mit der Ausführung des Temperierungssystems im Werkzeug beeinflusst. Man versucht die Kühlungsdauer so anzupassen, dass die wärmste Stelle des Gussteils ausreichend gekühlt ist. Zudem ist bei der Konstruktion des Temperierungssystems darauf zu achten, dass das Temperaturfeld im Werkzeug und Bauteil möglichst gleichmäßig ist und die Ableitung der Wärme möglichst schnell erfolgt.



**Abb. 5.18** Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche

Die Wiederholung eines Temperaturzyklus gilt während der Herstellung dann als stabil, wenn die abgeführte Wärme aus dem Werkzeug gleich der zugeführten ist. Die benötigte Wärmemenge ist von der Masse der Einspritzdosis, dem Materialtyp (spezifische Wärmekapazität), der Temperatur bei der Abformung, vom

Leitungssystems und der Zykluszeit abhängig. Die Wärme, welche aus dem Werkzeug abgegeben wird, wird teilweise in Leitungssystemen in den Werkzeugaufnahmen der Maschine transportiert oder wird durch Konvektion in die Umgebung abgegeben. Der größte Teil wird mittels Temperierungssystem reguliert.

Die einzige Möglichkeit für einen stabilen Prozessablauf und eine hohe Qualität der Erzeugnisse besteht in der Sicherung der Wärmestabilität im Werkzeug, was nur durch ein qualitativ hochwertiges Temperierungssystem ermöglicht werden kann.

Zur Inbetriebnahme des Werkzeuges kann dieses vor der Implementierung in die Spritzgussmaschine temperiert werden oder direkt im montierten Zustand auf die gewünschte Arbeitstemperatur gebracht werden. Die Einspritzung erfolgt automatisch. Während der Zyklen stabilisiert sich die Temperatur (siehe Bild 5.19), sodass anfangs Teile mit unterschiedlichen Schwindungen, sogenannte „Anfahrtsteile“ entstehen und damit meist Ausschuss darstellen. Erst nach der Stabilisierung des Temperaturzyklus im Werkzeug ist die Wiederholbarkeit bei der Herstellung gesichert und die Teile zeigen gleichbleibende Maßhaltigkeiten. In der Praxis ist die Anzahl dieser „Anfahrtsteile“ individuell und hängt hauptsächlich von der Geometrie der Teile und der Sorte des Kunststoffes ab, gewöhnlich handelt es sich dabei um 3 bis 10 Stück.

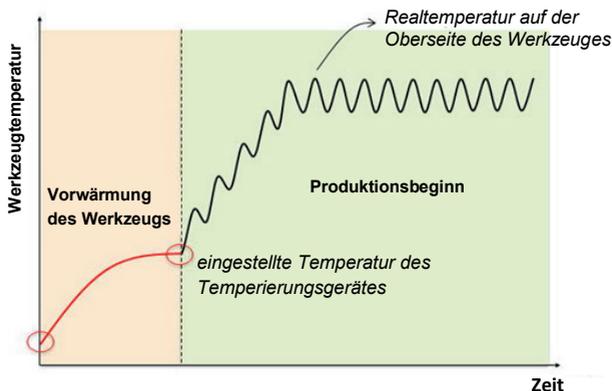


Abb. 5.19 Beispiele der Temperaturprofile

## 5.4.7 Kühlungszeit

Die Kühlungszeit ( $t_k$ ) und die Nachdruckzeit sind hauptsächlich von der Wanddicke des Bauteils abhängig. Der Beginn der Kühlungszeit ist im Augenblick der vollständigen Füllung des Werkzeughohlraumes mit der Schmelze gegeben, das ist gleichzeitig der Beginn der Nachdruckphase. Die gesamte Kühlungszeit besteht aus der Nachdruckzeit und der Kühlungszeit. Für die Abschätzung der gesamten Kühlungszeit in industrieller Praxis kann eine empirische Formel (3) benutzt werden, welche für Teile mit Wanddicken ( $s$ ) von 1 mm bis 4 mm und einer Werkzeugtemperatur bis 60 °C gilt.

$$t_k = s \cdot (1+2 \cdot s) \text{ [s]} \quad (3)$$

Im Fall einer Werkzeugtemperatur über 60 °C verlängert sich die resultierende Zeit um 30%. Die abgeschätzten Kühlungszeiten bestehen aus Nachdruck- und Kühlungszeit im ungefähren Verhältnis von 30 % zu 70 %. Z. B. im Fall der Einspritzung von Teilen aus Polypropylen (PP) mit der Wanddicke 3 mm: Gesamte Kühlungszeit  $t_k = 21$  s, daraus folgt eine Nachdruckzeit von 6,5 s und eine restliche Kühlungszeit von 14,5 s.

**Die Gesamtzeit des Einspritzzyklus** besteht aus folgenden Abschnitten:

- Werkzeug Schließzeit,
- Maschinenzeit zum Heranrücken der Spritzeinheit,
- Einspritzzeit,
- Nachdruckzeit,
- restliche Kühlungszeit (entspricht der Plastifizierungszeit für die neue Dosis des Kunststoffes),
- Maschinenzeit zum Öffnung des Werkzeuges,
- Zeit zum Auswerfen des Produktes,
- Manipulationszeit (z. B. bei der Gründung metallischer Einpressteilen im Werkzeug u. ä.).

Individuelle Einstellungen der Parameter für einzelne Teile beim Einspritzverfahren beeinflussen nicht nur die Zeit je Bauteil, sondern auch die Gesamtzeit des Verfahrens. Es ist immer notwendig den Einfluss auf die Effektivität der Herstellung und die gesamten ökonomischen Aspekte abzuwägen.

Das Spritzgießverfahren entwickelt sich dynamisch die ganze Zeit seit dessen Entstehung, insbesondere auf Grund der Industrieanforderungen. Diese Anforderungen, wie zum Beispiel die Fertigung von extra dünnen, hohlen oder geschäumten Bauteilen, sind sehr oft außer Möglichkeiten des Standard-Spritzgießens. Deswegen kommt es ständig zu größeren oder kleineren Modifikationen des Spritzgießverfahrens, die oft eine deutliche Änderung von Anlagen – Spritzgießmaschinen, Werkzeuge, Zusatzanlagen usw. bedeuten. Es gibt viele unkonventionelle Methoden im Bereich des Spritzgießens. Die folgenden Kapitel beschreiben die wichtigsten von Ihnen.

## 6.1

### Thermoplast-Schaumspritzgießen (Leichtbauwerkstoffe)

Das **Schaumspritzgießen** ermöglicht die Fertigung von geschäumten Bauteilen, die sich mit niedriger Dichte auszeichnen, was es eine Gewichtersparung bedeutet. Diese kann auf zwei Arten erzielt werden, entweder mit *chemischen* oder *physikalischen* Treibmitteln, wobei beide Methoden technologisch sehr unterschiedlich sind. Ziel beider Methoden ist es ein Bauteil mit geschäumtem Kern und kompakter Oberfläche zu schaffen.

#### 6.1.1 Spritzgießen mit chemischen Treibmitteln

Das Spritzgießen mit der Zugabe des Treibmittels ist eine sehr einfache Methode, die an üblichen Spritzgießmaschinen durchgeführt wird und keine Änderung der Konstruktion der Maschine erfordert. Das Treibmittel enthält eine expansive Komponente und wird meistens in Granulatform verwendet. Die Treibmittelmenge ist unterschiedlich (in Abhängigkeit von dem geforderten Grad der Aufschäumung) und bewegt sich meistens von 0,5 % bis 3 %. Das Treibmittel wird erst mit dem Grundmaterial in der Dosieranlage vermischt und dann zusammen im Plastifizierzylinder der Spritzgießmaschine plastifiziert (geschmolzen). Mit Einwirkung der Temperatur kommt es zur Aktivierung des Treibmittels – zur chemischen

Zersetzung und Entstehung von Gasen (Kohlendioxid oder Stickstoff). Die Temperatur für die Treibmittelzerersetzung muss der Schmelztemperatur des Kunststoffes ähnlich sein (siehe Tab. 6.1). Somit wird versichert, dass das Treibmittel nicht früher als der Kunststoff geschmolzen wird. Die ganze Materialdosis wird dann in den Hohlraum des Spritzgießwerkzeuges gespritzt, wobei das Volumen der Formhölung von 80 % bis 90 % gefüllt werden sollte. Das vollständige Füllen des Werkzeuges wird durch nachfolgende Gasexpansion erreicht. Die Nachdrucksphase wird durch den Druck ersetzt, der durch die Treibmittelexpansion verursacht wird. Ein weiterer Unterschied im Produktionszyklus ist die verlängerte Abkühlungszeit, da die thermisch-isolierenden Eigenschaften des geschäumten Materials viel höher sind.

**Tab. 6.1** Beispiele der chemischen Treibstoffe

Treibstoff	Abkürzung	Reaktion	Zersetzungs-temperatur [°C]	Gelöstes Gas
Zitronensäure		Endothermisch	160 - 210	CO <sub>2</sub>
Azodicarbonamid	ADCA	Exothermisch	205 - 215	N <sub>2</sub>
Oxybisbenzolsulfonylhydrazid	OBSH	Exothermisch	158 - 160	N <sub>2</sub>
p-Toulensulfonylhydrazid	TSH	Exothermisch	110 - 120	N <sub>2</sub>
p-Toulensulfonylsemikarbazid	TSS	Exothermisch	228 - 235	N <sub>2</sub>
Dinitrosopentamethylenetetramid	DNPT	Exothermisch	190	N <sub>2</sub>
5-Phenyltetrazol	5PT	Exothermisch	240 - 250	N <sub>2</sub>

Empfohlene Anlage:

- Spritzgießmaschine mit Schließdüse (verhindert vorzeitige Gasexpansion in dem Plastifizierzylinder),
- Selbstständige Aufheizung der Düsen.

Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- hohe Einspritzgeschwindigkeit,
- Phase „ohne“ Nachdruck,
- verlängerte Abkühlungszeit.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

**Vorteile:**

- einfacher Prozess,

- Anlage ohne Notwendigkeit einer maschinellen Sonderausstattung,
- Fertigung von Produkten mit großer Wandstärke ohne Einfallstellen möglich (bis zu 20 mm),
- niedrigere Innenspannung des Werkstücks,
- Bauteile mit niedriger Dichte – Gewicht (Senkung der Dichte um ca. 5 % bis 35 %),
- gute akustische Eigenschaften des Bauteils,
- niedrigere Drücke während des Spritzgießprozesses und somit geringere Schließkraft der Maschine.

**Nachteile:**

- Spritzgießfehler auf der Oberfläche des Bauteils unter Einfluss des Treibmittels (Luftschlieren),
- ungleichmäßige Zerteilung der Schaumstruktur (Größe der Hohlräume ist unterschiedlich) – Verlust mechanischer Eigenschaften des Teils (siehe Abb. 6.1),
- begrenzte Temperaturbeständigkeit des chemischen Treibmittels,
- ziemlich lange Zeit für Verflüchtigung der Treibmittelreste (bis zu 48 Stunden) – ergänzende Verfahren (z.B. Lackierung) können zeitlich verschoben werden.



**Abb. 6.1** Schnitt durch ein geschäumtes Bauteil

Die mit dieser Technologie gefertigten Produkte werden in vielen Anwendungen der Automobil- und Verbrauchsgüterindustrie, im Bauwesen und bei Herstellung von Spielzeugen genutzt, siehe Abb. 6.2.



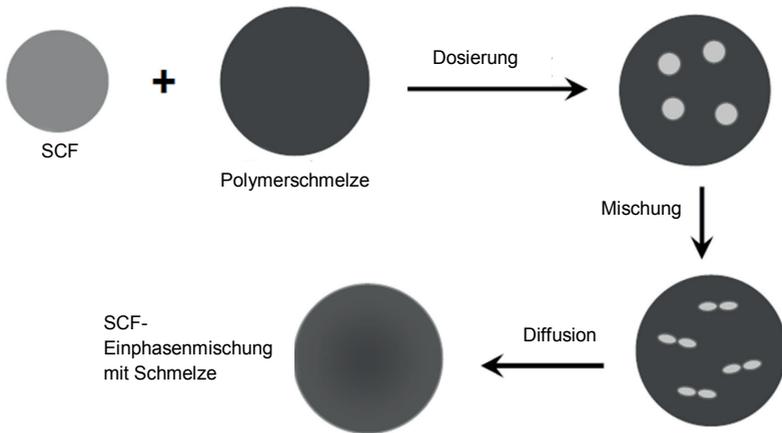
*Abb. 6.2 Beispiele der Bauteile aus Leichtbauwerkstoffen*

### 6.1.2 Spritzgießen mit physikalischen Treibmitteln

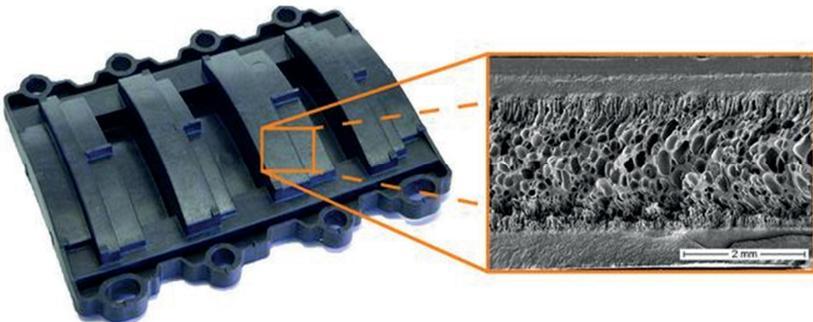
Die bestens bekannte Technologie, die das Prinzip des Kunststoffspritzgießens mit physikalischen Treibmitteln nutzt, ist die **MuCell** Technologie (Mikrozelluläres Schaumspritzgussverfahren). Es handelt sich um ein Verfahren, das von der Firma Trexel entwickelt wurde. Es geht um Gasbeladung mit Stickstoff ( $N_2$ ) oder Kohlendioxid ( $CO_2$ ) im superkritischen Zustand (als superkritisches Fluid - SCF bezeichnet) direkt in der Polymerschmelze in der Phase der Plastifizierung mit Hilfe von speziellen Gasinjektionen, die Bestandteil der Spritzeinheit der Maschine sind. Der superkritische Gaszustand wird durch entsprechenden Druck und Temperatur in dem Dosiersystem erreicht. Als superkritisches Fluid wird der Stoff bezeichnet, der sich über seiner kritischen Temperatur und Druck befindet (Kohlendioxid erreicht die superkritischen Bedingungen schon bei der Temperatur  $31\text{ °C}$  und einem Druck von  $7,3\text{ MPa}$ , der Stickstoff bei  $-147\text{ °C}$  und  $3,4\text{ MPa}$ ). Der superkritische Fluidzustand weist eine Viskosität von Gas und gleichzeitig eine von Flüssigkeit entsprechenden Dichte auf. Das superkritisch zusammengedrückte Gas wird in die Schmelze mit der Schnecke des Plastifizierzylinders intensiv eingemischt und dann kommt es zu seiner vollständigen Diffusion in die Polymerschmelze. Das Ergebnis ist eine homogene Mischung (siehe Abb. 6.3), die zum Einspritzen in den Hohlraum des Spritzwerkzeuges vorbereitet ist.

Diese Mischung wird in dem Plastifizierzylinder der Maschine die ganze Zeit unter dem sog. Arbeitsdruck gehalten, sodass es nicht zur vorzeitigen Gasnukleation kommt. Bei der Drucksenkung (im Moment der Öffnung der Spritzdüse) wird die

Dosis der Schmelze in den Werkzeughohlraum eingespritzt, wo es zur Gasnukleation-Bildung von Hohlraumkeimen in der Kunststoffschmelze kommt. Dank dem homogenen Gasinhalt in der Schmelze kommt es zur regelmäßigen Bildung der Hohlstellen im Produktkeim mit Größe  $< 100 \mu\text{m}$  (in der Regel  $5 - 10 \mu\text{m}$ ). Unter Einfluss der schnellen Abkühlung der Schmelze kommt es zu fast keiner Bildung von Hohlstellen auf der Oberfläche des Bauteils. Die Mikrozellenstruktur vom Keim wird so in fester Materialschale „verkapselt“, wie in der Abb. 6.4 zu sehen ist. Die Anzahl und Größe der Hohlstellen ist von der Schmelzviskosität, Abkühlungszeit, Spritzdruck, Gasmenge und Bauteilstärke abhängig.



**Abb. 6.3** Herstellung der homogenen Mischung der Polymerschmelze mit SCF

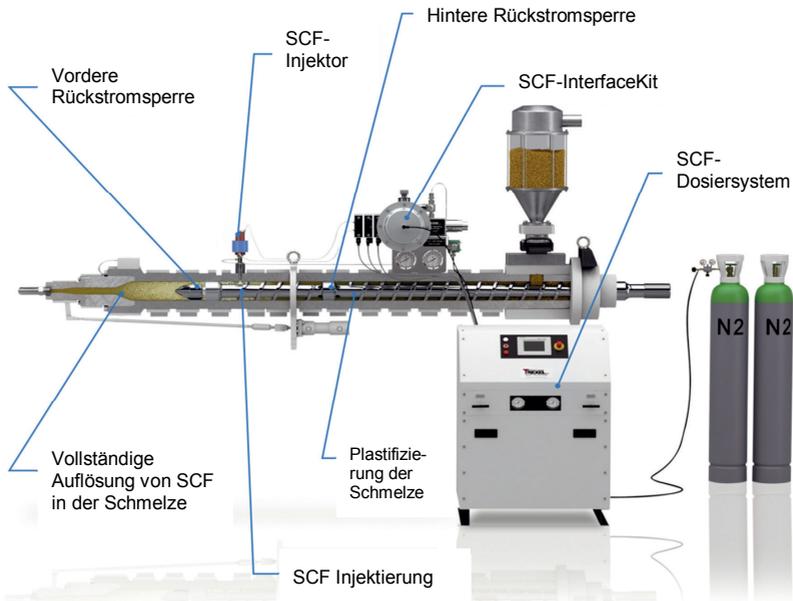


**Abb. 6.4** Strukturabbildung beim mit der MuCell-Technologie gefertigten Bauteil

Spezifische Anlagen:

Hinsichtlich der Prinzipien von Technologien, die Hochdrücke nutzen, sind spezielle Anlagen notwendig (siehe Abb. 6.5):

- Gasdruckflaschen,
- SCF-Modul (SCF-Dosiersystem),
- Injektor für SCF, der pneumatisch betrieben wird,
- Spritzeinheit mit spezieller Geometrie der Schnecke, die dazu noch mit einem Wisch- und Mischteil, zwei Rückstromsperren, verlängertem Zylinder mit einem Loch für den Injektor und einer Schließdüse ausgestattet ist.



**Abb. 6.5** Maschinelle Ausstattung der MuCell-Technologie

Spezifische technologische Einstellung vom Spritzgießprozess:

- Temperaturprofil verläuft von dem Befülltrichter zum Injektor standardweise, weiterhin flach,
- hoher Rückdruck – Betriebsdruck,
- hohe Spritzgießgeschwindigkeit,

- Einspritzen gesamter Menge – kein Materialpolster,
- kein oder sehr geringer Nachdruck,
- SCF-Menge nach Polymertyp dosiert.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

**Vorteile:**

- Bauteile mit kleiner Dichte – Gewicht (Dichtereduzierung um ca. 5 % bis 30 %),
- minimaler Verlust von mechanischen Eigenschaften (bei Aufschäumung bis ca. 15 %),
- deutliche Reduzierung von Deformationen am Bauteil,
- minimales Potential der Einfallstellenbildung,
- hohe Fließfähigkeit der Schmelze – niedrigerer Druck in dem Hohlraum des Werkzeuges, geringere Schließkraft (bis um 60 %),
- minimale Innenspannung im Produkt,
- minimale Begrenzung für die Konstruktion der Wandstärken,
- unbegrenzte Gastemperaturbeständigkeit – jedes Polymer kann geschäumt werden,
- in der Regel kürzere Zykluszeiten (bis um 20 %).

**Nachteile:**

- Oberflächenfehler (Luftschlieren),
- ziemlich lange Zeit für die Verflüchtigung der Treibmittelreste.

Zu den typischen Applikationen gehören formanspruchsvolle und geometrisch exakte unsichtbare Bauteile (in einem Zusammenbau) für die Automobilindustrie und Elektrotechnik (siehe Abb. 6.6).



**Abb. 6.6** Mit MuCell-Technologie hergestellter Konnektor (PBT GF20)

Das **Innendruck-Spritzgießen** ermöglicht die Fertigung von Werkstücken mit dicker Wand (mit geschlossener Höhlung) ohne Bildung von Einfallstellen und ohne extrem lange Abkühlungszeit (es entfällt die Notwendigkeit, große Kunststoffmengen zu kühlen). Zu diesem Zweck werden zwei Grundtechnologien genutzt: *Gasinnendrucktechnik* (GIT – Gas Injection Technology) und *Wasserinnendrucktechnik* (WIT – Water Injection Technology).

### 6.2.1 Gasinnendrucktechnik

Prinzip der Technologie besteht in der Zufuhr von Inertgas in konkrete Hohlstellen des Werkzeugs, das teilweise oder ganz mit der Kunststoffschmelze ausgefüllt ist, mit der Absicht einen abgeschlossenen Hohlraum im Spritzgussbauteil zu bilden.

Das meist verwendete Gas ist der reine Stickstoff (Reinheit mind. 99,8%) mit der Möglichkeit seines Zusammendrückens im Bereich von 10 MPa bis 40 MPa. Das Verfahren Gasinnendrucktechnik ist ähnlich der konventionellen Spritzgießtechnologien und basiert auf dem Schließen des Werkzeugs, Einspritzen, Nachdruck und Abkühlung der Schmelze, Öffnen des Werkzeugs und Auswerfen des Produkts. Die Nachdruckfunktion wird jedoch vom Gas übernommen (Methoden der Umschaltung vom Spritzdruck sind identisch mit den Methoden der konventionellen Spritzgießtechnologie). Da der Gasdruck an allen Stellen des Hohlräume gleich ist (beim Gasinjektor als auch bei den letzten Stellen des gebildeten Hohlräume), sind große Drücke wie beim konventionellen Spritzgießen nicht notwendig. Die Druckreduktion beträgt 40 % bis 80 %. Das Gas wird am Anfang mit einem niedrigeren Druck zugeführt, so dass ein Hohlraum gebildet wird und keine Oberflächenfehler entstehen. Nach vollständiger Füllung des Formhohlraums wird der Druck erhöht, so dass eine exakte Form des Bauteils erreicht wird. Vereinfacht gilt es, dass für die flüssigeren Kunststoffe ein niedrigerer Druck notwendig ist, und umgekehrt.

Aus der technologischen Sicht gibt es zwei Arten der Bildung vom Hohlraum in Kunststoffbauteilen:

**Kurzer Spritzguss und Aufblasverfahren:** es handelt sich um ein technologisches Verfahren, bei dem der Formhohlraum mit der Schmelze nur zum Teil gefüllt (zu 50 % bis 90 %) und die Schmelze nachfolgend in die hinteren Stellen

des Formhohlraums mit dem Gasdruck gedrückt wird, wodurch sich in dem Spritzgussteil ein geschlossener Gashohlraum bildet. Das größte Problem des Verfahrens ist die Wahl des Volumens der gespritzten Schmelzdosis in die Form. Bei einem zu kleinen Volumen der gespritzten Kunststoffschmelze und folgender Gasinjektion kommt es beim Ausfüllen des Formhohlraums zum Durchdrängen des Gases durch die Vorderwand der Schmelze. Bei einer zu großen Schmelzdosis wird der innere geschlossene Hohlraum nicht in der ganzen Länge des Produkts gebildet. Bei dieser Methode ist es typisch, dass die Dicke der Injektionswand mit Entfernung des Gaswegs abnimmt.

**Langer Spritzguss und Ausblasverfahren:** es handelt sich um ein technologisches Verfahren, bei dem das Gas in die Kavität erst nach vollständiger Füllung der Schmelze eingespritzt wird. Die überflüssige Schmelze wird im Verlauf der Hohlraumbildung in eine Nebenkavität der Spritzgussform oder zurück in den Schneckenzyylinder ausgeblas. Technologisches Problem dieses Spritzgussverfahrens ist die Größe des Gasdrucks, der experimentell für konkrete technologische Parameter (Schmelz- und Formtemperatur, Verzugszeit vom Material in dem Plastifizierzylinder usw.) geprüft wird. Es wird mit einem niedrigeren Gasdruck angefangen und die Größe des gebildeten Gashohlraums kontrolliert. Bei Bedarf wird der Gasdruck erhöht. Bei diesem Spritzgussverfahren ist die Wandstärke des Spritzgussteils in ganzer Länge des Formhohlraums gleichmäßiger.

Spezifische Anlagen:

- Gasinjektor oder spezielle Nadelverschlussdüse (mit einer Hohl-nadel für die Zufuhr vom Gas),
- Gasdruckbehälter,
- Druckeinheit.

Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- Zeitverzögerung zwischen dem Spritzguss von Schmelze und Gas (ca. 1 - 2 s, mit steigender Verzögerung wird die Wandstärke vom Spritzgussteil größer),
- geringerer Nachdruck mit Hilfe von Gas,
- geringere Schließkraft der Maschine (Formung des Hohlraums mit dem Gas bei einem niedrigen Druck).

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

**Vorteile:**

- Gewichtseinsparung (Werkstück mit einem geschlossenen Hohlraum),
- Werkstücke mit dicker Wand und einem Hohlraum ohne Einfallstellen,
- geringere Schließkraft,
- geringere Deformation der Flächen und Minimalisierung der Lunker,
- kürzere Abkühlungszeiten wegen der geringeren Wandstärken bei Erhaltung der Abkühlungsfläche der Gussform,
- die Technologie ist für integrierte Bauteile mit der Kombination von dünnen und dicken Wänden geeignet.

**Nachteile:**

- höherer Beschaffungspreis der Anlage (Spritzgießwerkzeug, Maschine),
- problematische Abkühlung in dem Hohlraum des Spritzgussteils,
- verschlechterte Qualität der inneren Oberfläche des geschlossenen Hohlraums,
- begrenzte Umsetzung der Mehrfach-Spritzgießwerkzeuge,
- ungeeignet für Werkstücke mit einer Plattenform.

Zu den typischen Applikationen gehören vor allem Griffe und Klinken für die Automobilindustrie (siehe Abb. 6.7) oder Bauteile mit großer Wandstärke, idealerweise mit einem runden Querschnitt, hohle Rippen und die flache Werkstücke versteifen.



**Abb. 6.7** Werkstück mit einem geschlossenen Hohlraum (GIT-Spritzgussverfahren)

## 6.2.2 Wasserinnendrucktechnik

Spritzgießverfahren mit Wasser ist ähnlich dem Gasinnendruck-Spritzgießen. Das Wasser, so wie das Gas, übernimmt die Nachdruckfunktion. Und so wie beim Gas, ist auch bei Wasser der Druck an allen Stellen des erschaffenen Hohlraums der gleiche. Bei der Wahl des Wasserdrucks wird vom niedrigen zu einem höheren Druck fortgeschritten. Nach vollständiger Füllung des Formhohlraums wird der Wasserdruck höher, so dass eine exakte Form des Bauteils erreicht wird. Wie beim Gas ist auch beim Wasser die Verzögerung zwischen dem Spritzguss der Schmelze und der Wasserzufuhr sehr wichtig. Am Ende kann das Wasser aus dem Bauteil mit Druckluft verdrängt, eingesaugt oder in einen Behälter außerhalb des Spritzgießwerkzeugs gegossen werden.

### Spezifische Anlagen:

- Wasserinjektor oder spezielle Nadelverschlussdüse (mit einer Hohl-nadel für die Wasserzufuhr),
- Druckeinheit.

### Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- Zeitverzögerung zwischen dem Spritzguss von Schmelze und Wasser,
- geringerer Nachdruck mit Hilfe von Wasser,
- geringere Schließkraft der Maschine.

### **Vorteile:**

- Gewichtseinsparung,
- Werkstücke mit dicker Wand und einem Hohlraum ohne Einfallstellen,
- Fertigung von größeren Hohlräumen als bei GIT möglich,
- glatte Oberfläche der Innenwände vom Hohlraum des Spritzgussteils (siehe Abb. 6.8),
- die Abkühlungszeit viel kürzer als beim GIT Verfahren (bis zu 80 %),
- geringere Schließkraft notwendig,
- geringere Deformation der Gussteilflächen und Minimalisierung der Lunker.

### **Nachteile:**

- höherer Beschaffungspreis der Anlage (Spritzgießwerkzeug, Maschine),
- nachträgliches Entfernen von Wasser,

- Gefahr einer unvollständigen Formung vom Hohlraum mit Dampf (Folge der unzureichenden Wassermenge, die sich schnell aufwärmt und verdampft),
- begrenzte Umsetzung von Mehrfach-Spritzgießwerkzeuge.

*Geeignete Applikationen* sind vor allem hohle Werkstücke mit hoher Festigkeit, wie z. B. Pedale (siehe Abb. 6.8), und auch verschiedene Rohrleitungen für Luft- oder Flüssigkeitsverteilungssysteme, bzw. verschiedene Klinken und Griffe.



**Abb. 6.8** Werkstück mit einem geschlossenen Hohlraum (WIT-Spritzgussverfahren) und der Qualitätsunterschied in der Oberfläche des Hohlraums

### 6.3

### Mikrospritzgießen

Das **Mikrospritzgießen** ermöglicht die Herstellung von Mikroteilen mit einem Gewicht unter 1 g (siehe Abb. 6.9). Zur Spritzgießfertigung von Mikroformteilen werden Spritzgießmaschinen mit spezieller Spritzeinheit (Materialplastifizierung mit Schnecke, Spritzgusskolben, siehe Abb. 6.10) verwendet. Das Spritzgießsystem mit dem Kolben ermöglicht einen höheren Spritzgießdruck, der für die Füllung von Hohlräumen mit sehr dünnen Wandstärken notwendig ist. Die Fertigung der Spritzgießwerkzeuge ist in Hinblick auf die Ausmaße der Werkstücke sehr anspruchsvoll und das Auswerfen der Bauteile aus dem Werkzeug wegen der Größe der Werkstücke sehr spezifisch. Die Maßkontrolle der hergestellten Kunststoffteile erfolgt üblicherweise unter einem Mikroskop.

Spezifische Anlagen:

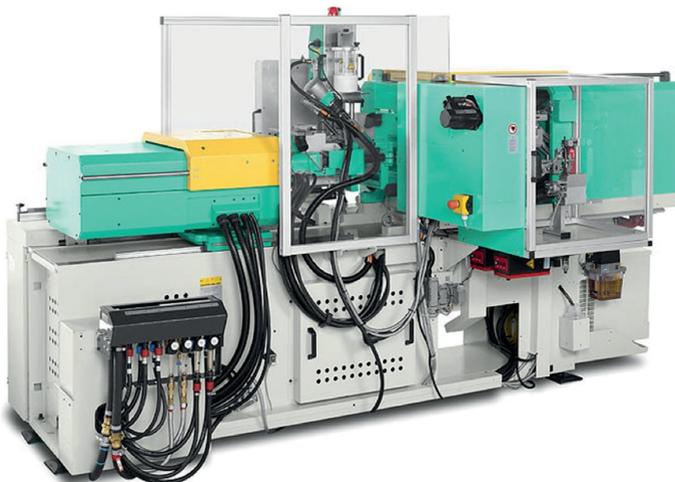
- spezielle Spritzeinheit (Kombination der Schnecke für die Materialplastifizierung und des Kolbens für das Einspritzen der Schmelze).

Spezifische technologische Einstellung vom Spritzgießverfahren:

- hoher Spritzdruck,
- hohe Spritzgeschwindigkeit.



**Abb. 6.9** Mit dem Mikrospritzgießen hergestelltes Bauteil



**Abb. 6.10** Maschine mit Spritzgießeinheit für das Mikrospritzgießen



speziellen Technologien realisiert. Zurzeit ist es unter Berücksichtigung der Kunststoffentwicklung nicht notwendig, da auf dem Markt schon spezielle Werkstoffe existieren, die für das Spritzgießen von dünnwandigen Bauteilen bestimmt sind. Diese Werkstoffe sind meistens auf PA 4.6-Basis.

*Typische Applikationen* sind sehr kleine Teilchen für das Gesundheitswesen, Elektronik und Feinmechanik (siehe Abb. 6.11)

## 6.4

### Mehrkomponentenspritzgießen

Das **Mehrkomponenten- oder Mehrfarbenspritzgießen** ist heutzutage ein Standardverfahren, das in einem Kunststoffteil zwei oder mehrere Polymere, oder zwei oder mehrere Farben von einem Kunststoff kombiniert (verbindet). Die Verbindung der Polymere basiert auf chemischen, kohäsiven und adhäsiven Bindungen, die mit geeigneter Konstruktion der Bindung unterstützt werden können. Die Mehrkomponenten- oder Mehrfarben-Spritzgießtechnologie unterscheidet sich von der herkömmlichen Technologie durch die Spritzgießform, die das Einspritzen verschiedener Kunststoffe oder Farben in die einzelnen Formhohlräume während eines Spritzgießzyklus ermöglichen muss. Weiterhin sind zu dem Spritzgießwerkzeug zwei (Zweikomponenten-/Zweifarbenspritzgießen) oder drei (Dreikomponenten-/Dreifarbenspritzgießen), bzw. vier (Vierkomponenten-/Vierfarbenspritzgießen) Spritzeinheiten angeschlossen, siehe Abb. 6.12. Spritzeinheiten haben individuell gesteuerte Heiz-, Dosier- und technologische Parameter. Je nach der Art und Anzahl der Spritzkomponenten und deren Konstruktion unterscheidet sich auch die Aufstellung der Spritzeinheiten.

Zu den wichtigsten Arbeitsgängen beim Mehrkomponenten- oder Mehrfarbenspritzgießen gehört der **Übertragungsprozess der Spritzgussteile** während der Spritzzyklen von einer Formhohle in eine andere. In der Praxis gibt es folgende Möglichkeiten:

- eine Hälfte des Spritzgießwerkzeugs wird um seine horizontale Achse gedreht,
- eine Hälfte des Spritzgießwerkzeugs wird um seine vertikale Achse gedreht,
- ein Teil des Spritzgießwerkzeugs wird um die horizontale Achse (Technik mit Indexplatte) gedreht,
- bewegliche Matrize oder Kavität wird verwendet,

- beweglicher Schieber des Werkzeugs – Formkerne (sog. Schiebertechnik) wird verwendet,
- Roboter Einbeziehung.

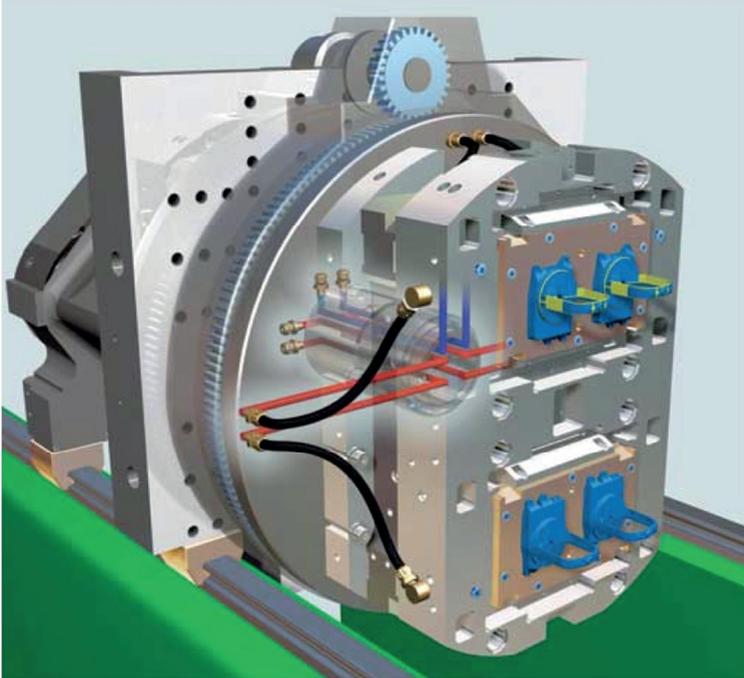


**Abb. 6.12** Spritzgießmaschine mit einer horizontaler und drei vertikalen Spritzeinheiten

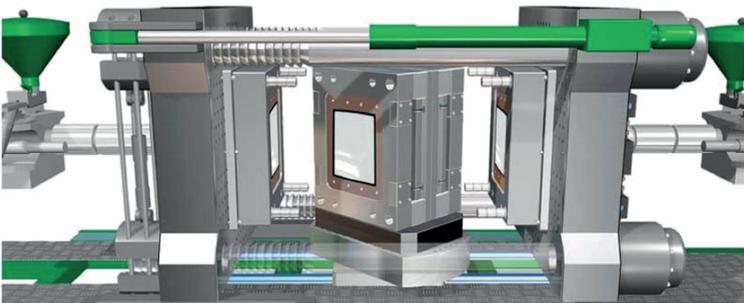
Bei der **Drehung des Spritzgießwerkzeugs um seine horizontale Achse** funktioniert eine Hälfte des Werkzeugs als beweglicher Teil der Spritzgießform, der sich zu einzelnen Spritzeinheiten je nach den eingestellten technologischen Zeiten dreht (siehe Abb. 6.13). Die Rotationsbewegungen können entweder alternierend (Zweilag-Spritzgießwerkzeug) oder kontinuierlich (Dreilag-Spritzgießwerkzeug) sein. Die Achsen des Drehteils der Form müssen den Achsen des Festteils der Form in der Toleranz von 0,05 mm entsprechen.

Bei der **Drehung des Spritzgießwerkzeugs um seine vertikale Achse** kommt es zum Drehen der mittleren Platte in Richtung der zweiten Hälfte des Spritzgießwerkzeugs (siehe Abb. 6.14). Zu einer reibungslosen Drehung muss die Öffnungsgröße des Werkzeugs dimensioniert werden. Die Spritzeinheiten spritzen gegeneinander und werden nur durch die Stärke der Drehplatte getrennt, wodurch die Schließkräfte (um ca. 30 % bis 50 %) reduziert werden, weil die auf die Schmelze

wirkenden Spritzdrücke gegeneinander wirken. Nachteil dieser Lösung ist die übermäßige Größe (Länge) der Spritzgießmaschinen.

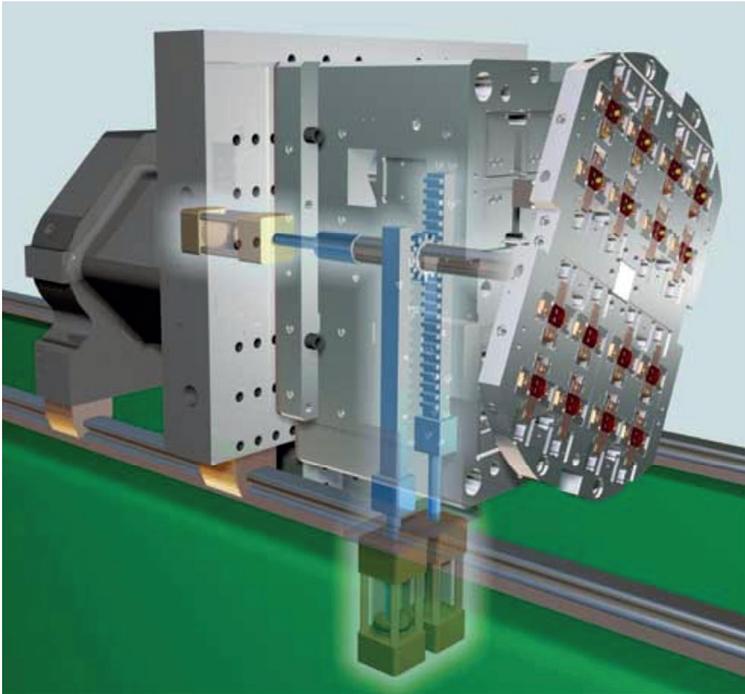


**Abb. 6.13** Beispiel eines Spritzgießwerkzeugs mit Rotation um die horizontale Achse



**Abb. 6.14** Beispiel vom Werkzeug mit Rotation um vertikale Achse

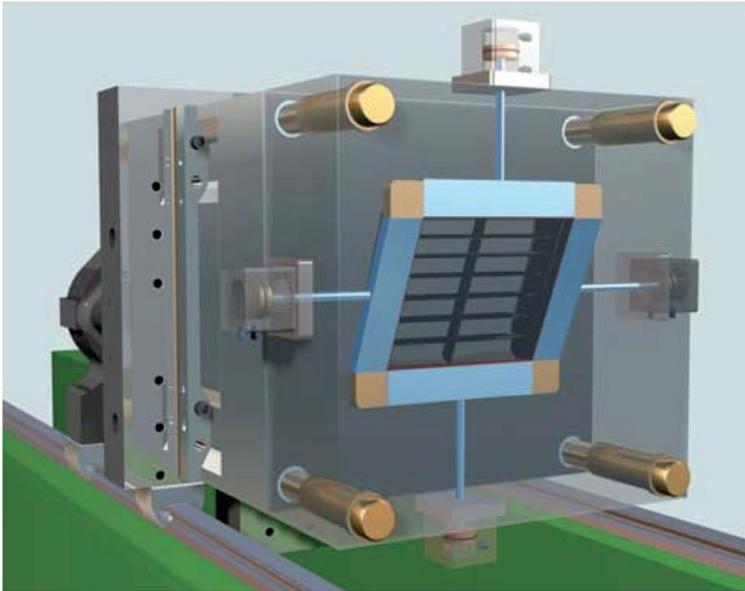
Wenn nur **ein Teil des Spritzgießwerkzeugs um die horizontale Achse rotiert**, dreht sich nur ein Teil der beweglichen Hälfte des Spritzgießwerkzeugs, die sog. Indexplatte (siehe Abb. 6.15). Prinzip und Steuerung sind identisch zu der Variante, bei der sich ein Teil des Spritzgießwerkzeugs um die horizontale Achse rotiert.



**Abb. 6.15** Beispiel einer Indexplatte

Bei Verwendung des **verschiebbaren Spritzgießwerkzeugteils – der Formkerne** (siehe Abb. 6.16) werden diese vor allem entweder beim lokalen Bespritzen mit einem zweiten Kunststoff oder eines weichen (z. B. thermoplastische Elastomere oder Silikon) auf einen harten Kunststoff (z.B. PP, PC, PA usw.). Der bewegliche Formteil des Spritzgießwerkzeugs schließt oder öffnet den Teil des Formhohlraums, der mit der Schmelze gefüllt werden soll. Der Nachteil ist manchmal ein längerer Einspritzzyklus, weil die einzelnen Komponenten wie in früheren Fällen

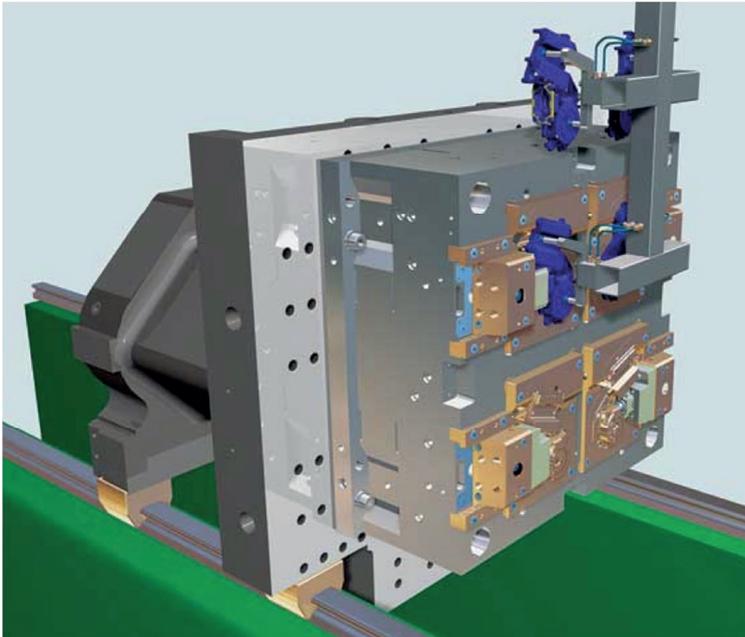
nicht zur gleichen Zeit, sondern allmählich eingespritzt werden. Beide Materialien sind meist stumpf.



**Abb. 6.16** Beispiele eines verschiebbaren Werkzeugteils

Vorteil der bisher genannten Überspritzungsarten ist ihr voller Kontakt mit der Kavität der Form in jedem Zyklus, der die freie Schwindung von Spritzgussteilen verhindert. Ein geschlossener Kontakt zwischen den Bauteilen und ihren Kavitäten stellt eine optimale Wärmeleitung dar.

Die Verwendung von **Robotern** (siehe Abb. 6.17) wird vor allem bei größeren Kunststoffteilen oder bei Bauteilen, die an zwei Maschinen gespritzt werden, eingesetzt. Der Robotereinsatz führt aufgrund der längeren Bewegungsdauer in der Regel zu einer Verlängerung der gesamten Zykluszeit. Auf der anderen Seite ist der Einsatz von Robotern eine der am häufigsten verwendeten Methoden, um Produkte von einer Position in eine andere zu positionieren.



**Abb. 6.17** Beispiel einer Umsetzung mit dem Roboter

Spezifische Anlagen:

- Maschine mit entsprechender Anzahl der Spritzeinheiten,
- Werkzeug für Mehrkomponentenspritzgießen,
- in meisten Fällen mit Roboter.

Spezifische technologische Einstellung vom Spritzgießverfahren:

- Einstellung standardweise, nur für jede Spritzeinheit separat.

**Vorteile:**

- Herstellung von Mehrkomponententeilen möglich.

**Nachteile:**

- höherer Anlagenpreis (Werkzeuge, Maschinen, Zusatzanlagen).

*Typische Applikationen* sind z. B. Dichtungsklappen, Handgriffe, Halter, Werkzeuge, Verschlussring von Kraftstoffbehältern und viele weitere (siehe Abb. 6.18).



Abb. 6.18 Beispiele der Mehrkomponententeile

## 6.5

## Sandwich-Spritzgießverfahren

Das **Sandwich-Spritzgießverfahren** ermöglicht die Fertigung von Bauteilen, die unterschiedliche Werkstoffe auf der Oberfläche und im Kern des Stückwerks besitzen. Die Werkstoffe können unterschiedlich sein, müssen jedoch miteinander mischbar sein und sollten ähnliche technologische Parameter für das Spritzgießen aufweisen (z. B. Schmelztemperatur). Sandwichteile sind strukturell vergleichbar mit Standardspritzteilen und können dünn- oder dickwandig sein.

Das Spritzgießverfahren ist aus der Sicht der einzelnen Phasen mit dem Standard-Spritzgießen identisch. Technologisch kann das Verfahren in zwei oder drei Schritte untergliedert werden:

- eine Kunststoffschmelze (genau definierte Menge) wird zunächst in die Spritzgussform eingespritzt, von der in der weiteren Phase die Oberflächenschicht des Werkstücks entsteht,
- danach wird in den plastischen Kern die Schmelze eingespritzt, die das Werkstück bildet (Zweistufenprozess), bzw. am Ende wird noch eine Schmelze eingespritzt, die ganz auf der Oberfläche des Kunststoffteils ist, und die Oberfläche so abgeschlossen wird (Dreistufenprozess).

Die Oberflächenschicht nach dem ersten Einströmen der Masse wird nach ihrer Abkühlung (durch Kontakt mit der Wand des Werkzeugs) nicht mehr bewegt. In Richtung Mitte der Masse kühlt sich der Werkstoff jedoch langsamer ab und behält eine höhere Temperatur, ermöglicht somit den Fluss eines zweiten Kunststoffes in

die Werkzeugkavität und gleichzeitig eine perfekte Verbindung beider Werkstoffe. Materialverschiebung entsteht nur in den Schichten, die noch nicht fest geworden sind. Damit kommt es zur Füllung des Formhohlraumes über die gesamte Oberfläche des Werkstücks und der Werkstoff des Kerns ist somit in den Werkstoff der Oberfläche „eingeschlossen“. Es folgt die Nachdrucksphase wie beim konventionellen Spritzgießverfahren, da die Schmelzen beider Kunststoffe immer noch ausreichend plastisch sind.

#### Spezifische Anlagen:

- Maschine mit zwei Spritzeinheiten,
- spezielle Maschinendüse, die zwei Spritzeinheiten mit einem Formhohlraum enthält, und die Schmelze in die Formkavität mit druckgesteuerten Mechanismen dosiert, die wiederum die Nadelschlussdüse in Abhängigkeit von den Druckverhältnissen im Formhohlraum steuern.

#### Spezifische technologische Einstellung vom Spritzgießverfahren:

- Einstellung standardweise, nur für jede Spritzeinheit separat,
- Nachdruck sichergestellt durch das letzte Einspritzen.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

#### **Vorteile:**

- geeignet sowohl für dünn- als auch dickwandige Bauteile,
- Materialersparung – Spritzkern kann aus Rezyklat sein oder geschäumt werden (siehe Abb. 6.19),
- Schließkraftreduzierung – beim mit Treibmitteln geschäumten Kern,
- Integrierung vom Funktionswerkstoff rein in den Produkt – Beschattung, Funktion als Barriere usw.,
- versteifte Produkte mit ausgezeichneter Oberflächenqualität – Kern aus Kunststoff mit Fasern gefüllt, Oberfläche aus ungefülltem Kunststoff.

#### **Nachteile:**

- höherer Maschinenpreis.

Zu den *typischen Applikationen* dieser Technologie gehören überwiegend Designprodukte mit Hochglanzoberfläche oder mit versteiftem, bzw. geschäumtem Kern.



**Abb. 6.19** Sandwich-Teil mit geschäumtem Kern

## 6.6

### Hybridspritzguss – Überspritzen

Es gibt mehrere **Hybridspritzgusstechnologien** und sie unterscheiden sich insbesondere in dem, auf welcher Weise oder welcher Werkstoff in das Werkzeug zum nachfolgenden Einspritzen in die Form eingelegt wird. Der Grundprinzip ist immer der gleiche, in den Formhohlraum wird vor dem Abschließen ein Material eingelegt (Metall, Textilien, Folie usw.), das nachher mit der Schmelze überspritzt wird, wobei eine feste Verbindung entsteht.

**In-Mold Verfahren** – in die Trennlinie des Werkzeugs wird mit einem Roboter der meist umgeformte Teil eingelegt, der dann in dem Werkzeug abgeschlossen und mit der Schmelze des Tragkunststoffs überspritzt, wodurch es zu einer festen Verbindung (Zusammenschmelzung) beider Werkstoffe kommt. Zu typischen Produkten dieser Technologie gehören Fahrradhelme (siehe Abb. 6.20). Ihre Fertigung besteht aus der Einlegung der Polycarbonat Schalen und Versteifungselemente in die Werkzeughöhlung, in die nachfolgend unter Einwirkung von Temperatur und Druck (während des Spritzgießens) das Polystyrol (PS-E) expandiert wird. Resultat ist ein kompakter, sicherer und sehr stabiler Helm.



**Abb. 6.20** Beispiel eines mit *In-Mold* hergestellten Produkts

***In-Mould Labeling (IML)*** – dieses Verfahren ist für das Anbringen von Beschriftungsetiketten auf das Produkt, direkt im Werkzeug, bestimmt. Vor dem Schließen des Werkzeugs wird mit Hilfe von Robotern die formangepasste Etikette aus dem Speicher entnommen und anschließend an eine vorher definierte Stelle in der Form eingelegt (siehe Abb. 6.21). Die Etikettenfolie ist mehrschichtig. Nach dem Schließen der Form und Einspritzen der Schmelze entsteht eine feste Verbindung der Etikette und des Grundwerkstoffes. Zu den typischen Produkten gehören Becher, Eimer und Verpackungen von Nahrungsmitteln.



**Abb. 6.21** Einlegen der Etikette in die Kavität des Spritzgießwerkzeugs

**In-Mould Decoration (IMD)** – in diesem Fall wird eine dekorative Folie eingelegt, die sich zwischen den Spritzgusszyklen über die Trennlinie der Spritzgießform abrollt. Mit Hilfe von Vorwärmung (mit Heizkörpern aus keramischen Strahlern oder IR Rohrleitungen) und Vakuum kopiert die Folie dann die Werkzeugoberfläche (Vakuum verhindert unter anderem auch das Zusammendrücken der Folie). Dann schließt sich das Werkzeug, es kommt zum Einspritzen der Schmelze und folgendem Nachdrücken und Abkühlen des Kunststoffes in dem Hohlraum des Werkzeugs. An der Kontaktstelle der Schmelze mit der Folie kommt es zum festen Zusammenschweißen und beim Öffnen der Form wird die zugeschweißte Fläche von dem Rest der tragenden Folie abgetrennt. Zum Dekorieren kommt es also mit Hilfe eines bedruckten dünnen Films, der auf das Bauteil während des Spritzgusses von der tragenden Folie übertragen wird (in der Regel auf PET-Basis). Die IMD-Folie besteht aus einer Tragfolie mit der Stärke von 30 µm bis 75 µm, einer Trennschicht (sog. release layer), die nach der Aktivierung mit Wärme die Abtrennung der dünnen Folie von der Tragfolie ermöglicht und weiter aus einer durchsichtigen Sicherheitsschicht (Kratzschutz), einer Dekorschicht (ca. 10 µm dick) und einer Adhäsionsschicht, die nach Aktivierung mit Wärme die Adhäsion zwischen der gedruckten Folie und dem Kunststoffteil sicherstellt. Typische Produkte sind Steuerelemente der Instrumententafel, Zierblenden usw. (siehe Abb. 6.22).



**Abb. 6.22** Beispiel eines Bauteils vom IMD-Verfahren

Spezifische Anlagen:

- aufbereitetes Spritzgießwerkzeug,

- Roboter,
- Abrollmechanismus.

Spezifische technologische Einstellung vom Spritzgießverfahren:

- niedriger Spritzdruck.

**Vorteile:**

- Designteile (große Menge von Dekorfolien).

**Nachteile:**

- höherer Preis des Werkzeugs und der zusätzlichen Anlagen.

Bei Herstellung von Bauteilen mit hoher Oberflächenqualität ist es notwendig, dass die Schmelze fähig ist, möglichst viel von der Oberfläche der Höhlung in der Form zu kopieren. Diese Fähigkeit der Schmelze ist eng mit ihrer Viskosität und somit auch Temperatur verknüpft. Beim konventionellen Spritzguss muss zum Erreichen einer besseren Oberflächenqualität die Temperatur des Werkzeugs erhöht werden, was den Spritzgusszyklus enorm verlängert. Deswegen wurden mehrere Technologien entwickelt, die auf dem sog. *dynamischen Aufwärmen des Werkzeugs* basieren. Diese Technologien erwärmen entweder das gesamte Werkzeug oder nur einen Teil (Oberseite der Form). Die Wärmequelle kann entweder außerhalb (z.B. Infrarotstrahler) oder als Bestandteil des Werkzeugs sein. Je nach der Methode der Aufheizung werden diese Technologien dann in folgende untergliedert:

- RHCM (Rapid Heat Cycle Moulding),
- IHM (Induction Heating Moulding),
- EM (Electricity Heating Mold).

**RHCM** – Aufheizung der Form wird mit einem Dampfstromkanal gesichert, um die Abkühlung der Form kümmern sich konventionelle Abkühlkanäle. Im Zyklusverlauf kommt es zur Umschaltung der Strömung in den einzelnen Kanälen.

**IHM** – Bestandteil der Form ist eine Spule, die eine an die Werkzeughöhlung adaptierte Form hat und vor dem Einspritzen die Höhlung mit elektromagnetischem

Feld und dank Entstehung des Wirbelstroms aufheizt. Die Kühlung verläuft über konventionelle Kühlungskanäle, wobei das Kühlmedium kontinuierlich strömt.

**EM** – Die Form wird mit inneren Widerstandsheizkörpern aufgeheizt, die je nach Bedarf in der Form aufgestellt sind.

Alle diese Methoden führen zu einer hohen Temperatur in der dünnen Schicht an der Oberfläche der Form. Dadurch wird der Schmelze ermöglicht, die Formoberfläche perfekt zu kopieren, wie in der Abb. 6.23 zu sehen ist.



**Abb. 6.23** Beispiel eines Produktes der IHM-Technologie

Spezifische Anlagen:

- spezielle Spritzgießform,
- adaptierte Temperierungsanlage,
- Roboter.

Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- hohe Spritzgeschwindigkeit.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

**Vorteile:**

- hoher Oberflächenglanz (kein weiteres Lackieren notwendig),

- Bauteile ohne Fließnähte und Einfallstellen,
- kleinere Bauteildeformationen,
- hohe Qualität der Bauteiloberfläche, auch bei Werkstoffen mit faserartigen Füllmitteln,
- hoher Oberflächenglanz auch bei geschäumten Bauteilen (beseitigt Mängel der Treibmittel einschließlich der MuCell-Technologie),
- ideal für dünnwandige Bauteile,
- Zykluszeit bei dickwandigen Bauteilen ist kürzer.

**Nachteile:**

- höherer Preis des Werkzeugs.

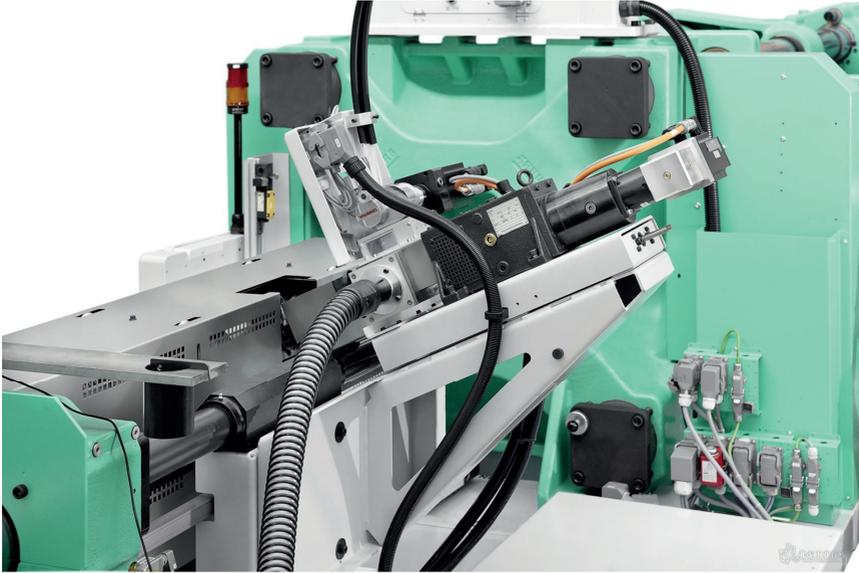
## 6.8

## Spritzgießen von hochfesten Bauteilen

*Spritzgießen von hochfesten Bauteilen* basiert immer auf Werkstoffen, die mit Faserfüllstoffen, wie z. B. Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Metall- oder andere Faser, gefüllt sind. Die am meisten verwendete Faser ist die Glasfaser, entweder kurze (0,2 mm bis 0,6mm) oder lange (8 mm bis 16mm), die im Granulat enthalten sind. Der Werkstoff wird an üblichen Spritzgießmaschinen und im konventionellen Verfahren verarbeitet. Heutzutage gibt es jedoch Verfahren, die aus der Sicht der Bauteilfestigkeit einen viel höheren Festigungseffekt erreichen. Eine der Methoden ist zum Beispiel das FDC-Verfahren (Faser-Direct-Compoundieren) oder sog. Hinterspritzen von Organoblechen.

*Beim FDC-Verfahren (Fibre Direct Compounding)*, manchmal auch LDFI (Long Fiber Direct Injection Moulding) genannt, treten in das Spritzgießverfahren unendliche Fasern (Glas- oder Kohlenstofffaser) ein, die von einem Glasfaseroving abgerollt und mit einer servo-elektrischen Seitenbeschickung und Schneidvorrichtung (siehe Abb. 6.24) auf eine finale Länge (15 mm bis 50mm) zugeschnitten und direkt in die Schmelze in dem Schmelzzylinder der Spritzgießmaschine dosiert werden. Die Spritzeinheit ist mit einer Schnecke mit Zweistufenkompression ausgestattet, das heißt in dem ersten Teil der Schnecke wird die Schmelze vorbereitet und im zweiten werden die Faser zugegeben, die in der Schmelze mit Hilfe der Schnecke durchmischt werden sollen. Diese Methode ist viel schonender für die Fasern auf Hinsicht ihrer Brüchigkeit. Faserlängen, Faseranteile und Materialkombinationen

lassen sich individuell einstellen. Eingangswerkstoffe (Kunststoff und Rovings aus den Glasfasern) sind preisgünstiger als die mit den langen Fasern verstärkten Granulate.



**Abb. 6.24** Seitenbeschickung mit unendlichen Fasern

Spezifische Anlagen:

- Faserroving,
- Seitenbeschickung und Schneidvorrichtung,
- spezielle Schnecke mit einer Zweistufenkompression.

**Hinterspritzen von Organoblechen** – diese Technologie wird auch als *Organomelt* oder *FibreForm* bezeichnet. Dabei handelt sich um ein Verfahren, das Halbzeuge nutzt – Schichtenzuschnitte der gerollten Glas- oder Kohlenstofffasern, die meistens mit PA 6 oder PP (bzw. PA 6.6, PA 12, PPS, TPU oder PC) imprägniert sind. Diese Zuschnitte enthalten ca. 50% Fasern und werden in verschiedenen Stärken hergestellt (siehe Abb. 6.25).



**Abb. 6.25** PA 6-Zuschnitte mit 50 % Glasfasern (TEPEX)

Die Halbzeuge werden von dem Faserroving durch Roboter abgenommen und zu dem Heizkörper übertragen, der sie schnell auf ca. 300 °C (bei Polyamid imprägnierten Zuschnitten) aufheizt. Dann werden sie in die Form eingelegt, durch das Schließen der Form geformt und nachfolgend mit der Schmelze des gleichen Polymers mit einem Faserinhalt von 30 % bis 50% hinterspritzt. Ergebnis sind sehr leichte und feste Bauteile. Der Fertigungsprozess kombiniert also das Spritzgießverfahren und das Heizformen von thermoplastischen Kompositwerkstoffen. Es bietet auch die Möglichkeit der Integration von Zusatzverstärkungen mit Rippen oder Funktionselementen, die zum Beispiel zur Befestigung des Enderzeugnisses dienen, was ein hohes Potential für den Ersatz von Metallen bietet.

Spezifische Anlagen:

- spezielles Werkzeug,
- Behälter für die Halbzeuge,
- Heizanlage zur Aufheizung der Halbzeuge,
- Thermokamera zur Überwachung des Durchwärmens der Halbzeuge,
- Roboter.

**Vorteile:**

- hohe Festigkeit und Steifigkeit der Bauteile bei niedrigem Gewicht.

### **Nachteile:**

- höherer Preis der Anlagen.

*Beispielanwendungen* sind leichte, steife Bauteile für die Automobilindustrie und Luftfahrtindustrie, Elektronik und Sportmittel (siehe Abb. 6.26).



**Abb. 6.26** Hochfeste Bauteile in der Automobilindustrie hergestellt im Organomelt-Verfahren

**Pulverspritzgießverfahren** (PIM – Powder Injection Moulding) beschäftigt sich mit der Verarbeitung von Werkstoffen mit einem hohen Anteil an Metall- oder Keramikpulver und ermöglicht so die Herstellung von vollmetallischen (MIM – Metal Injection Moulding) oder keramischen Bauteilen (CIM – Ceramic Injection Moulding).

Als Eingangsmaterial wird Granulat verwendet, das ein feines Metall- oder Keramikpulver in Größe (1,5 - 45)  $\mu\text{m}$  enthält, welches in einer Polymermatrize (PE, PP, POM, PA, PMMA oder Spezialwachs) durchmischt wird. Der Anteil der Polymermatrize beträgt im Granulat 35 vol. % bis 55 vol. %. Das Granulat wird ähnlich wie beim konventionellen Spritzgießprozess verarbeitet, nur mit dem Unterschied, dass die Teile aus der Maschine mit einem Roboter entnommen

werden, da das Bauteil in dieser Prozessphase relativ brüchig ist. Nach dem Ausnehmen des Werkstücks aus der Form folgt die Beseitigung des Kunststoffes (Binder), die in Form einer Auflösung (bei PA), einer katalytischen chemischen Reaktion (bei POM) oder einer Zersetzung bei Temperaturen von 400 °C bis 450 °C (bei PE-, PP-, PMMA- und Wachspolymeren) verlaufen kann. In diesem Zustand sind die Bauteile dank der Mindestmenge von Binder und kleinen Van-der-Waals-Kräften stabil. In der letzten Phase des Herstellungsverfahrens kommt es zum Sintern vom Metall- oder Keramikpulver bei Temperaturen zwischen 1450 °C und 2000 °C, je nach Art des verwendeten Pulvers. Die Enderzeugnisse sind homogen und haben eine größere Schwindung als bei konventionellen Technologien (ca. 20 %). Die Bauteildichte nähert sich an 99,9 % des theoretischen Werts der Pulvermaterialdichte. Die Anisotropie der Bauteilschwindung ist in hohem Maße vom verwendeten Pulvertyp und der Pulverform abhängig. Die größte Anisotropie der Schwindung zeigen Bauteile, die aus Werkstoff mit flachförmigem Pulver hergestellt sind, wobei Bauteile aus Werkstoffen mit kugelförmigem Pulver eine kleinere und vor allem isotrope Schwindung haben.

#### Spezifische Anlagen:

- Spritzeinheit und –form, mit Oberflächenaufbereitung zur Erhöhung der Beständigkeit gegen Abnutzung,
- Roboter zum Ausnehmen der Werkstücke aus dem Werkzeug,
- Sinterofen (bei MIM mit Schutzatmosphäre).

#### Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- sehr kleines oder kein Nachdrücken in der Spritzphase.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

#### **Vorteile:**

- große Produktivität in der Metallteil- und Keramikeilherstellung,
- isotrope Eigenschaften des Bauteils (in Abhängigkeit von Form des Pulvers),
- hohe Qualität der Oberfläche (bei Verwendung des feinen Pulvers),
- hohe Maßhaltigkeit gegenüber dem Verfahren des exakten Gießens,
- geeignet für sehr kleine Bauteile (ca. 1g).

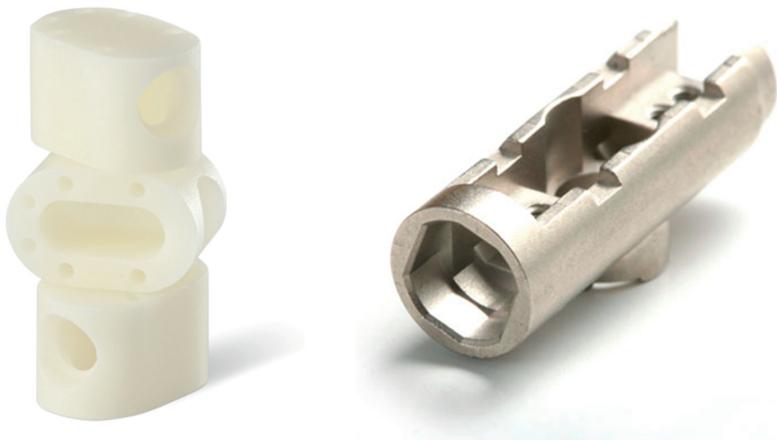
**Nachteile:**

- höherer Anlagenpreis,
- beschleunigte Abnutzung der Spritzgießmaschine und -form,
- energetisch anspruchsvolles Verfahren.

Mit Rücksicht auf die mit Formen- und Anlagenbetrieb zusammenhängenden Kosten, Länge vom Fertigungszyklus und Minimalisierung der Fertigungsfehler hat das MIM-Verfahren folgende Empfehlungen bezüglich Beschränkung der Bauteilform und -größe:

- größtes Bauteilmaß ca. 100 mm,
- Bauteilgewicht < 100 g,
- Bauteilwandstärke < 10 mm,
- Bauteile ohne innere geschlossene Höhlungen,
- Bauteile ohne scharfe Kanten,
- Bauteile mit kleinen Änderungen der Wandstärke,
- Bauteile ohne Einstech- und Gewichtsreduzierungs-elementen auf den inneren Flächen.

Diese Technologie findet insbesondere im Gesundheitswesen, in der Automobil-, Textil- und Waffenindustrie, wo in Großserien hergestellt wird, die zu kompliziert (anspruchsvoll) zu schaffen sind (siehe Abb. 6.27), Verwendung.



**Abb. 6.27** Beispiel eines Keramik- und Metallbauteils hergestellt im PIM-Verfahren

Als *LIM-Verfahren* (Liquid Injection Moulding) bezeichnen wir das Spritzgießen von flüssigen Werkstoffen. Vom konventionellen Spritzguss unterscheidet es sich sehr, da das Eingangsmaterial eine Flüssigkeit ist. Bedeutsamer Vertreter dieser Technologien ist das Spritzgießen von flüssigen Silikonem (LSR).

**LSR (Liquid Silicon Rubber)** ist das verbreitetste Verfahren für die Verarbeitung vom flüssigen Silikon. Silikon wird standardweise in einer flüssigen Zweikomponenten-Form geliefert. In der ersten Phase wird es mit einem Kolben von Fässern unterschiedlichen Volumens in die Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine dosiert (häufigstes Volumen sind 100 Liter, die Fässer können jedoch viel kleiner sein). Hier kommt es zur Vermischung beider Komponenten und folgendem Einspritzen in die Höhlung des Spritzgießwerkzeugs. Silikone werden in der Spritzeinheit bei Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C vermischt. Dank des Platinkatalysators wird in einer der Silikonkomponenten gleichzeitig auch der Vulkanisierungsprozess (Vernetzung der Makromoleküle) gestartet. Dieser Prozess würde jedoch extrem lange dauern. Zum Erstarren würde erst nach einigen Tagen kommen. Deswegen wird das Spritzwerkzeug auf die Vulkanisierungstemperatur aufgeheizt: (160 - 220) °C (je nach Silikonart), die das Erstarren deutlich beschleunigt.



Abb. 6.28 Spritzgießmaschine für die LSR-Technologie

Die Konstruktion der Spritzgießmaschine (siehe Abb. 6.29) ist im Vergleich zu der konventionellen Maschine sehr unterschiedlich, insbesondere in der Dosieranlage, in der Geometrie der Schnecke, in der Konstruktion der Rückverschlussdüse, und es fehlt die Heizung an der Spritzeinheit. Diese Technologie ist sehr anspruchsvoll, insbesondere in der Gestaltung des Werkzeugs. Die Werkzeugform wird auf die Betriebstemperatur entweder mit Hochdruckwasser, -öl oder mit Widerstandsheizkörpern aufgeheizt. Das Silikon muss dabei nur in der Höhlung und nicht in der Angussleitung vulkanisieren. Deswegen werden speziell gekühlte Angüsse verwendet. Eine weitere Anforderung ist die Anpassung der Form in der Trennlinie. Silikon reduziert beim Kontakt mit der aufgeheizten Form für einen Moment seine Viskosität. In diesem Moment gibt es die Gefahr der Angussbildung. Es wird daher empfohlen für das Spritzgießen von Silikon die Form so anzupassen, dass die größte Ungenauigkeit in der Trennlinie 0,003 mm bis 0,005 mm liegt. Das bedeutet, dass die Werkstücke nicht mit herkömmlichen Stiften entformt werden können, da diese für ihre Bewegung eine größere Bewegungstoleranz benötigen. So exakte Passungen ermöglichen der Form keine natürliche Entlüftung während ihrer Füllung. Es müssen Vakuümhöhlungen verwendet werden. Die Entformung ist ebenfalls kompliziert. Silikon hat eine große Adhäsion zu der Oberfläche der Form. Es ist deswegen notwendig, die Oberfläche der Form mit einer speziellen Narbung zu verschaffen.

#### Spezifische Anlagen:

- Dosieranlagen (Fässer),
- Spritzeinheit für LSR,
- Spritzgießwerkzeug für LSR,
- spezielle Temperierungsanlage für die Werkzeugaufheizung,
- Vakuumtechnik.

#### Spezifische technologische Einstellung des Spritzgießverfahrens:

- Mischung der Silikonkomponenten bei Raumtemperatur,
- hohe Werkzeugtemperatur für die Materialvulkanisierung.

Die genannte Technologie bringt eine Reihe von den unten genannten Vorteilen und Nachteilen.

**Vorteile:**

- Bauteile sind gesundheitsunschädlich,
- hohe Temperaturstabilität der Bauteile,
- hohe Formstabilität der Bauteile,
- große Fertigungsproduktivität,
- hochpräzise Teile.

**Nachteile:**

- Anlagen sowie Werkzeuge sehr kostenintensiv.

Zu den *typischen Produkten* des LSR-Verfahrens (siehe Abb. 6.29) gehören vor allem Gesundheitsmittel, Bauteile für Automobilindustrie, Optikteile usw. Das Verfahren kann für die Fertigung der Werkstücke allein gebraucht werden, oder auch für die Herstellung von Mehrkomponententeilen (Beispiel ist z.B. die Duscharmatur auf PBT- und Silikonbasis).



**Abb. 6.29** Beispiele der mit LSR-Verfahren hergestellten Silikonteile

- [1] BRYCE, Douglas M. *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 978-0872634725.
- [2] BUGNICOURT, E. und andere. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *eXPRESS Polymer Letters* 11 (8), 791-808 (2014).
- [3] CARAMITU, Alina Ruxandra und andere. PA6/EPDM Blends for electrical insulations, preliminary characterization. In *Advanced Topics in Electrical Engineering*. Bucharest, 2013.
- [4] COUSIN, Thibault und andere. Molecular modelling of polyphthalamides thermal properties: Comparison between modelling and experimental results. *Polymer* 53 (15), 229-234 (2012).
- [5] *Damit bei hohen Temperaturen das Kunststoffteil nicht schmilzt. Hitzebeständige Thermoplaste.*  
Verfügbar unter: [<https://www.kern.de/de/hochleistungskunststoffe>]
- [6] *Diabetes: Neue Ricordi-Kammer aus PPSU anstelle PEI.*  
Verfügbar unter: [<https://www.k-zeitung.de>]
- [7] DIER, Paul und Richard GORALSKI. *Gas assist injection molding*. Norfolk: Bauer Compressors, 2000. ISBN 978-1893677050.
- [8] DOMININGHAUS, Hans. *Plastics for engineers: materials, properties, applications*. Munich: Hanser, 1993. ISBN 3-446-15723-9.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [10] *Engineering plastics for extreme applications.*  
Verfügbar unter: [<http://plasticperspectives.com>]
- [11] GOODSHIP, Vanessa. *Practical guide to injection moulding*. Shawbury: Rapra Technology, 2004. ISBN 18-595-7444-0.
- [12] GOODSHIP, Vanessa. *Troubleshooting injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire: Rapra Technology, 2004. ISBN 978-185-9574-706.
- [13] GORDON, M. Joseph. *Total quality process control for injection molding*. Hoboken: Wiley, 2010. Wiley series on plastics engineering and technology. ISBN 978-0470229637.
- [14] GREENER, Jehuda und Reinhold. WIMBERGER-FRIEDL. *Precision injection molding: process, materials, and applications*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1569904008.
- [15] HEANEY, Donald F. *Handbook of metal injection molding*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0857090669.

- [16] Hochleistungskunststoffe - Polyphenylensulfid und Polyarylsulfone. *Kunststoffe.de*
- [17] *Honeycomb Heroes: Making Composites for Aerospace*. Verfügbar unter: [<http://advancedmanufacturing.org>]
- [18] CHANDA, Manas und Salil K. ROY. *Industrial polymers, specialty polymers, and their applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN-13:978-1-4200-8059-9.
- [19] *Injection molding troubleshooting guide*. Corvallis: Advanced Process Engineering, 2011. ISBN 978-146-6414-341.
- [20] J. M. MALLON. *Advances in automation for plastics injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology, 2001. ISBN 978-185-9572-832.
- [21] JOHANNABER, Friedrich. *Injection molding machines: a user's guide*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-1569904183.
- [22] *Kevlar aramid fiber (technical guide)*, DuPont.
- [23] KROSCHWITZ, Jacqueline I. *High performance polymers and composites*. New York: Wiley, 1991. ISBN 0-471-54366-7.
- [24] KUTZ, Myer. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. Boston: Elsevier/William Andrew, 2011. ISBN 978-1-4377-3514-7.
- [25] MICHAELI, Walter. *Training in injection molding a text- and workbook*. Munich: Hanser, 2001. ISBN 978-344-6214-187.
- [26] *Moderní materiály*. Liberec: TU Liberec, 2014. ISBN 978-80-7494-154-2.
- [27] Motor aus Kunststoff. *K-magazin*, Oktober 2016.
- [28] MUTSUDDY, C. Beebhas. *Ceramic injection molding*. London: Chapman and Hall, 1995. ISBN 978-041-2538-100.
- [29] NIAOUNAKIS, Michael. *Biopolymers: applications and trends*. Elsevier, 2015. ISBN 978-0-323-35399-1.
- [30] OLMSTED, Bernie A. und Martin E. DAVIS. *Practical injection molding*. New York: Marcel Dekker, 2001. ISBN 978-0824705299.
- [31] OSSWALD, A. Tim, TURNG, Lih-Sheng und Paul J. GRAMANN. *Injection molding handbook*. Munich: Hanser, 2008. ISBN 978-1569904206.
- [32] OTHMER, Kirk. *Encyclopedia of chemical technology*, Edition: 6, Chapter: Bioplastics - Biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics, Publisher: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 9780471485179.
- [33] PAJAK, Jolanta, ZIEMSKI Michal und Božena NOWAK. Poly(vinyl alcohol) – biodegradable vinyl materiál. *CHEMIK* 2010 (64), 7-8, 523-530.
- [34] *Plastics – the Facts 2017, An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- [35] PROKEŠ, Jan, STEJSKAL, Jaroslav und Mária OMASTOVÁ. Polyanilin a polypyrrol – dva představitelé vodivých polymerů. *Chemické listy* (95), 484-492 (2001).

- [36] RANDALL M. German. *Powder injection molding: design and applications*. State College, Pa: Innovative Material Solutions, 2003. ISBN 978-097-2764-209.
- [37] REES, Herbert und Bruce CATOEN. *Selecting injection molds: weighing cost versus productivity*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1569903896.
- [38] ROSATO, Dominick V., ROSATO, V. Donald und Marlene G. ROSATO. *Injection molding handbook*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN 978-079-2386-193.
- [39] ROSATO, Donald V., ROSATO, G. Marlene und Dominick V. ROSATO. *Concise encyclopedia of plastics*. Boston: Kluwer Academic, 2000. ISBN 978-0792384960.
- [40] ROSATO, V. Dominick und Donald V. ROSATO. *Injection molding handbook: the complete molding operation : technology, performance, economics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. ISBN 978-044-2278-151.
- [41] RUDNIK, Ewa. *Compostable polymer materials*. Boston: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-08-045371-2.
- [42] SHONAIKE, Gabriel O. und George P. SIMON. *Polymer blends and alloys*. New York: Marcel Dekker, 1999. ISBN 0-8247-1980-8.
- [43] *Silicones*. S.I.: General Books, 2010. ISBN 978-115-6027-950.
- [44] SPE, Society of Plastics Engineers a Plastics Design Library. Ed. by Hans-Peter Heim. PDL. *Specialized molding techniques*. Norwich, NY: Plastics Design Library, 2001. ISBN 18-842-0791-X.
- [45] STEIDL, Josef. O plastech v kontrastech. *MM Průmyslové spektrum* (4), 2017.
- [46] *The universal selection source: plastics and elastomers*.  
Verfügbar unter: [<https://omnexus.specialchem.com>]
- [47] UTRACKI, L. A. *Polymer blends handbook*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 1-4020-1110-5.
- [48] V. GOODSHIP und J. C. LOVE. *Multi-material injection moulding*. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology, 2002. ISBN 978-185-9573-273.
- [49] WHELAN, Tony und John GOFF. *Injection molding of thermoplastics materials*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. ISBN 978-147-5755-022.
- [50] XU, Jingyi. *Microcellular injection molding*. Hoboken: Wiley, 2010. ISBN 978-0470466124.
- [51] ZHENG, Rong, ROGER, I. Tanner und Xi-Jun FAN. *Injection molding integration of theory and modeling methods*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2212-635.
- [52] *3D tištěné krční implantáty zachránily život malým dětem*. Verfügbar unter: [<http://veda.stoplusjednicka.cz/3d-tistene-krcni-implantaty-zachranily-zivot-malym-detem>]

Technische Dokumentation von:

ANC Chemicals Co.,Ltd. | ARBURG GmbH & Co. KG | Australasian Bioplastics Association | Autodesk Inc. | BASF | Bond-Laminates GmbH | Calsak Corporation | Cole-Parmer | Corporation | Diener electronic GmbH & Co. KG | DimeLika Plast GmbH | DuPont | ELMET Elastomere Produktions- und Dienstleistungs GmbH | EMS-CHEMIE AG | ENGEL AUSTRIA GmbH | Evonik Industries | Fluorotherm Polymers Inc. | FTP plastics s.r.o. | FYTOVITA s.r.o. | Solvay | Granitol a.s. | Hardie Polymers Ltd. | HellermannTyton Group plc | Cheirón a.s. | INEOS Styrolution Group GmbH | Kistler Holding AG | KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG | Lep Engineering Plastics Ltd | KraussMaffei Technologies GmbH | Kunststoff-Technik Kuhn GmbH | Motan – Colortronic GmbH | PBI Performance Products Inc. | Piab | Piovan Central Europe GmbH | PolyOne Corporation | Reiloy Westland Corporation | RESINEX Czech Republic s.r.o. | RICO Elastomere Projecting GmbH | RocTool | Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH | Texpack Srl | The Dow Chemical Company | The Chemours Company | Thermo Fisher Scientific | Threadsindia Ltd. | Total Plastics Inc. | Trexel Inc. | WACKER CHEMIE AG | Wire Belt Company | Wittmann Battenfeld GmbH

Datenbanken:

Campus | Plastics prospector

Titel	<b>Moderne Kunststoffe und Faserverbunde Teil I. Kunststoffspritzguss: Werkstoffe und Verfahren</b>
Autoren	<b>Ing. Luboš Běhálek, Ph.D. Ing. Jiří Habr, Ph.D.</b>
Bestimmt für	<b>Studierende der Fakultät für Maschinenwesen der TU in Liberec und HS Zittau/Görlitz</b>
Herausgeber	<b>Technische Universität in Liberec Studentská 1402/2, Liberec</b>
Genehmigt von	<b>Rektorat der TUL am 15. 2. 2019, Ref.-Nr. RE 4/19</b>
Erscheinungsdatum	<b>März 2019</b>
Umfang	<b>140 Seiten</b>
Auflage	<b>erste</b>
Auflagenummer	<b>55-004-19</b>
Druckerei	<b>Vysokoškolský podnik Liberec, s.r.o. Studentská 2, CZ-Liberec</b>

**Diese Publikation wurde nicht redaktionell überarbeitet und korrigiert.**

**ISBN 978-80-7494-457-4**

