

Ulf Bruder

KUNSTSTOFF TECHNIK

leicht gemacht

Werkstoffe – Verarbeitung – Werkzeuggestaltung –
Kostenkalkulation – Nachbearbeitung – Fügeverfahren –
Materialauswahl – Konstruktionsregeln –
Prozessoptimierung – Fehlerbehebung



HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Alle in diesen Daten enthaltenen Berechnungen bzw. Angaben wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesen Daten enthaltenen Angaben mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden.

Bruder Consulting AB, Schweden, übernimmt infolgedessen keine Verantwortung und wird keine daraus folgenden Ansprüche oder sonstige Haftung übernehmen, die aus irgendeiner Weise aus der Benutzung dieser Berechnungen oder Angaben oder Teilen daraus entsteht.



Zusatzmaterial:

Auf folgender Website www.brucon.se (unter „Unsere Bücher“) können Sie auf zusätzliche Excel-Arbeitsdateien zugreifen.

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Ulf Bruder

Kunststofftechnik leicht gemacht

HANSER

Der Autor:

Ulf Bruder, Barkassgatan 9, SE-371 32 Karlskrona, Schweden

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen in folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Ulrike Wittmann

Übersetzung: Dr.-Ing. Harald Sambale, München

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: FIRMENGRUPPE APPL, aprinta druck GmbH, Wemding

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44957-2

E-Book ISBN: 978-3-446-44981-7

Inhalt

Vorwort	XVII	
Polymere und Kunststoffe	1	KAPITEL 1
1.1 Duroplaste	3	
1.2 Thermoplaste	4	
1.3 Amorphe und teilkristalline Kunststoffe	5	
Standardkunststoffe	7	KAPITEL 2
2.1 Polyethylen (PE)	7	
2.1.1 Einteilung	8	
2.1.2 Eigenschaften von Polyethylen	8	
2.1.3 Recycling	9	
2.1.4 Anwendungsgebiete	9	
2.2 Polypropylen (PP)	11	
2.2.1 Eigenschaften von Polypropylen	12	
2.2.2 Recycling	13	
2.3 Polyvinylchlorid (PVC)	13	
2.3.1 Eigenschaften von PVC	14	
2.3.2 Recycling	14	
2.4 Polystyrol (PS)	15	
2.4.1 Einteilung	16	
2.4.2 Eigenschaften von Polystyrol	16	
2.4.3 Recycling	17	
2.4.4 Anwendungsgebiete	17	
2.5 Styrol-Acrylnitril (SAN)	17	
2.6 Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	18	
2.6.1 ABS Blends	19	
2.6.2 Eigenschaften von ABS	19	
2.6.3 Recycling	19	
2.6.4 Anwendungsgebiete	20	
2.7 Polymethylmethacrylat (PMMA)	21	
2.7.1 Eigenschaften von PMMA	22	
2.7.2 Recycling	22	
2.7.3 Anwendungsgebiete	22	
Technische Kunststoffe	23	KAPITEL 3
3.1 Polyamid (Nylon)	23	
3.1.1 Einteilung	23	
3.1.2 Eigenschaften von Polyamid	25	
3.1.3 Recycling	25	
3.1.4 Anwendungsgebiete	25	

3.2	POM (Polyoxymethylen)	26
3.2.1	Eigenschaften von POM	27
3.2.2	Recycling	28
3.2.3	Anwendungsgebiete	28
3.3	Polyester	29
3.3.1	Eigenschaften von PBT und PET	31
3.3.2	Recycling	31
3.3.3	Anwendungsgebiete	31
3.4	Polycarbonat	33
3.4.1	Eigenschaften von Polycarbonat	34
3.4.2	Recycling	34
3.4.3	Anwendungsgebiete	34
KAPITEL 4	Thermoplastische Elastomere	36
4.1	TPE-O	36
4.1.1	Eigenschaften von TPE-O	36
4.1.2	Anwendungsbereiche	37
4.2	TPE-S	38
4.2.1	Eigenschaften von TPE-S	38
4.2.2	Anwendungsbereiche	39
4.3	TPE-V	39
4.3.1	Eigenschaften von TPE-V	40
4.3.2	Anwendungsbereiche	40
4.4	TPE-U	41
4.4.1	Eigenschaften von TPE-U	41
4.4.2	Anwendungsbereiche	42
4.5	TPE-E	42
4.5.1	Eigenschaften von TPE-E	42
4.5.2	Anwendungsbereiche	43
4.6	TPE-A	44
4.6.1	Eigenschaften von TPE-A	44
4.6.2	Anwendungsbereiche	45
KAPITEL 5	Hochleistungspolymere	46
5.1	Hochleistungsthermoplaste	46
5.1.1	Recycling	47
5.2	Fluorpolymere	47
5.2.1	Eigenschaften von PTFE	48
5.2.2	Anwendungsbereiche	48
5.3	Hochleistungs-Polyamid – PPA	49
5.3.1	Eigenschaften von PPA	49
5.3.2	Anwendungsbereiche	50
5.4	Flüssigkristalline Polymere – LCP	50
5.4.1	Eigenschaften von LCP	50
5.4.2	Anwendungsbereiche	51

5.5	Polyphenylensulfid – PPS	52	
5.5.1	Eigenschaften von PPS	52	
5.5.2	Anwendungsbereiche	52	
5.6	Polyetheretherketon – PEEK	53	
5.6.1	Eigenschaften von PEEK	53	
5.6.2	Anwendungsbereiche	54	
5.7	Polyetherimid – PEI	54	
5.7.1	Eigenschaften von PEI	55	
5.7.2	Anwendungsbereiche	55	
5.8	Polysulfon – PSU	56	
5.8.1	Eigenschaften von PSU	56	
5.8.2	Anwendungsbereiche	57	
5.9	Polyphenylsulfon – PPSU	57	
5.9.1	Eigenschaften von PPSU	57	
5.9.2	Anwendungsbereiche	58	
	Biokunststoffe und Biokomposite	59	KAPITEL 6
6.1	Definition	59	
6.1.1	Was bedeutet Biokunststoff?	60	
6.1.2	Markt	60	
6.1.3	Produktion und Einsatz von Biokunststoffen	61	
6.2	Biokunststoffe	62	
6.3	Biopolymere	62	
6.4	Polymere auf biologischer Basis: Biopolyester	64	
6.5	Polymere auf biologischer Basis: Biopolyamide	66	
6.6	Biopolymere auf Basis von Mikroorganismen	67	
6.7	Bioethanol oder Biomethanol	67	
6.8	Biokomposite	68	
6.9	Weitere Information zu Biokunststoffen	69	
	Kunststoffe und Umwelt	70	KAPITEL 7
7.1	Kunststoff ist klimafreundlich und spart Energie	70	
7.2	Auswirkungen der Umwelt auf Kunststoffe	72	
7.3	Recycling von Kunststoffen	73	
7.3.1	Kunststoff-Recycling in der EU	74	
	Modifizierung von Polymeren	76	KAPITEL 8
8.1	Polymerisation	76	
8.2	Additive	78	
8.2.1	Steifigkeit und Zugfestigkeit	79	
8.2.2	Oberflächenhärte	79	
8.2.3	Verschleißfestigkeit	79	
8.2.4	Zähigkeit	80	

8.3	Physikalische Eigenschaften	80
8.3.1	Erscheinungsbild	80
8.3.2	Kristallinität	81
8.3.3	Witterungsbeständigkeit	81
8.3.4	Reibungsverhalten	82
8.3.5	Dichte	82
8.4	Chemische Eigenschaften	83
8.4.1	Barriereigenschaften	83
8.4.2	Oxidationsbeständigkeit	83
8.4.3	Hydrolysebeständigkeit	84
8.5	Elektrische Eigenschaften	84
8.6	Thermische Eigenschaften	85
8.6.1	Wärmestabilisierung	85
8.6.2	Wärmeformbeständigkeit	86
8.6.3	Einstufung des Brandverhaltens	86
8.7	Materialpreis	87
KAPITEL 9	Materialdaten und Messgrößen	88
9.1	Zugfestigkeit und Steifigkeit	89
9.2	Schlagzähigkeit	92
9.3	Maximale Einsatztemperatur	93
9.3.1	Dauergebrauchstemperatur	93
9.3.2	Wärmeformbeständigkeit	93
9.4	Prüfung des Brandverhaltens	94
9.4.1	Brennbarkeitsklasse HB	95
9.4.2	Brennbarkeitsklasse V	95
9.5	Elektrische Eigenschaften	96
9.6	Fließeigenschaften: Schmelzindex	97
9.7	Schwindung	97
KAPITEL 10	Materialdatenbanken im Internet	98
10.1	CAMPUS	98
10.1.1	Eigenschaften von CAMPUS 5.2	99
10.2	Material Data Center	99
10.2.1	Eigenschaften des Material Data Center	100
10.3	Prospector Plastics Database	100
10.3.1	Eigenschaften der Prospector Plastics Database	101
KAPITEL 11	Prüfverfahren für Kunststoff-Rohstoffe und Formteile	102
11.1	Qualitätskontrolle bei der Herstellung des Rohstoffs	102
11.2	Visuelle Qualitätskontrolle von Kunststoffgranulaten	103
11.3	Visuelle Prüfung von Kunststoffteilen	104
11.4	Prüfungen, die der Spritzgießer durchführen kann	105
11.5	Spezielle Prüfverfahren	107

Spritzgießverfahren	110	KAPITEL 12
12.1 Geschichte	110	
12.2 Eigenschaften	111	
12.2.1 Einschränkungen	111	
12.3 Die Spritzgießmaschine	112	
12.3.1 Einspritzeinheit	112	
12.3.2 Schließeinheit	113	
12.3.3 Spritzgießzyklus	114	
12.4 Alternative Spritzgießverfahren	115	
12.4.1 Mehrkomponenten-Spritzgießen	115	
12.4.2 Gas- oder Wasser-Injektion	116	
Nachbearbeitungsverfahren	117	KAPITEL 13
13.1 Oberflächenbehandlung von Formteilen	117	
13.1.1 Bedrucken	117	
13.1.2 Heißprägen	118	
13.1.3 Tampondruck	119	
13.1.4 Siebdruck	119	
13.1.5 IMD: In-Mould-Dekorieren	120	
13.1.6 Lasermarkierung	121	
13.1.7 Lackierung	121	
13.1.8 Metallisierung/Verchromung	122	
Verschiedene Bauarten von Werkzeugen	123	KAPITEL 14
14.1 Zweiplattenwerkzeuge	123	
14.2 Dreiplattenwerkzeuge	124	
14.3 Schieberwerkzeuge	124	
14.4 Werkzeuge mit rotierenden Kernen	125	
14.5 Etagenwerkzeuge	125	
14.6 Werkzeuge mit Auswerfern an der festen Werkzeughälfte	126	
14.7 Familienwerkzeuge	126	
14.8 Mehrkomponenten-Werkzeuge	127	
14.9 Werkzeuge mit Schmelzkernen	128	
Aufbau von Werkzeugen	129	KAPITEL 15
15.1 Die Aufgaben des Werkzeugs	130	
15.2 Angussysteme – Kaltkanal	130	
15.3 Angussysteme – Heißkanal	132	
15.4 Pfropfenfänger/Angusszieher	133	
15.5 Temperier- und Kühlsysteme	134	
15.6 Belüftungssysteme	136	
15.7 Auswerfersysteme	137	
15.8 Entformungsschrägen	138	

KAPITEL 16	Werkzeuggestaltung und Produktqualität	139
16.1	Durch das Werkzeug verursachte Probleme	139
16.1.1	Zu schwache Werkzeugplatten	139
16.1.2	Fehlerhafte Auslegung von Anguss und Düse	140
16.1.3	Fehlerhafte Auslegung der Angusskanäle	141
16.1.4	Fehlerhafte Auslegung bzw. Positionierung oder Fehlen des Pfropfenfängers	141
16.1.5	Fehlerhafte Auslegung des Anschnitts	142
16.1.6	Fehlerhafte Entlüftung	143
16.1.7	Fehlerhafte Regelung der Werkzeugtemperatur	144
KAPITEL 17	Prototypenwerkzeuge und Analyse des Füllvorgangs	145
17.1	Prototypenwerkzeuge	145
17.2	Analyse des Füllvorgangs	146
17.2.1	Analyse des Füllvorgangs	146
17.3	Arbeitsablauf	147
17.3.1	Gitternetzmodell	147
17.3.2	Werkstoffauswahl	148
17.3.3	Verfahrensparameter	148
17.3.4	Auswahl des Anschnittpunkts	148
17.3.5	Simulation	149
17.3.6	Ergebnisse der Simulation	149
17.3.7	Füllverlauf	150
17.3.8	Druckverteilung	150
17.3.9	Schließkraft	150
17.3.10	Kühlzeit	151
17.3.11	Temperaturregelung	151
17.3.12	Schwindung und Verzug	151
17.3.13	Glasfaserorientierung	152
17.3.14	Analyse des Verzugs	152
17.3.15	Position des Anschnitts	152
17.3.16	Materialwechsel	153
17.3.17	Simulations-Software	153
KAPITEL 18	Rapid Prototyping und Additive Fertigungsverfahren	154
18.1	Prototypen	154
18.2	Rapid Prototyping (RP)	155
18.2.1	SLA – Stereolithographie	156
18.2.2	SLS – Selektives Laser Sintern	159
18.2.3	FDM – Fused Deposition Modeling	161
18.2.4	3D-Drucken	162
18.2.5	3D-Drucker	163
18.2.6	PolyJet	164
18.3	Generative Fertigung (Additive Manufacturing)	166

Kostenberechnungen für Formteile	168	KAPITEL 19
19.1 Berechnung der Bauteilkosten	169	
19.2 Szenarien Bauteilkosten	173	
19.3 Kostenvergleich	174	
Extrusion	177	KAPITEL 20
20.1 Der Extrusionsprozess	177	
20.1.1 Vorteile (+) und Grenzen (-)	177	
20.2 Materialien für die Extrusion	179	
20.3 Die Auslegung des Extruders	180	
20.3.1 Der Zylinder	180	
20.3.2 Einschneckenextruder	181	
20.3.3 Barrierschnecken	181	
20.3.4 Parallele Doppelschneckenextruder	182	
20.3.5 Konische Doppelschneckenextruder	182	
20.3.6 Rotationsrichtung	183	
20.3.7 Vergleich von Einschnecken- und Doppelschnecken- extrudern	183	
20.3.8 Werkzeug/Düse	184	
20.3.9 Kalibrierung	184	
20.3.10 Korrugatoren	185	
20.3.11 Kühlung	185	
20.3.12 Abzug	186	
20.3.13 Kennzeichnung	186	
20.3.14 Nachbearbeitung	187	
20.3.15 Trennen	187	
20.3.16 Wickeln	188	
20.4 Extrusionsverfahren	188	
20.4.1 Extrusion mit geradem Werkzeug	189	
20.4.2 Extrusion mit Umlenk-Werkzeug	189	
20.4.3 Extrusion von Platten	190	
20.4.4 Coextrusion	191	
20.4.5 Folienblasen	191	
20.4.5.1 Vorteile (+) und Grenzen (-) des Folienblasens	192	
20.4.6 Kabelherstellung	193	
20.4.7 Monofilamente	194	
20.4.8 Compoundierung	195	
20.5 Gestaltung von extrudierten Produkten	196	
20.5.1 Verrippung, Versteifung	197	
20.5.2 Hohlräume	197	
20.5.3 Dichtlippe	197	
20.5.4 Scharnier	198	
20.5.5 Führungen	198	
20.5.6 Gleitverbindung	198	
20.5.7 Schnappverbindung	199	
20.5.8 Balg	199	
20.5.9 Insert/Verstärkung	199	

	20.5.10 Reibung an der Oberfläche	200
	20.5.11 Bedrucken/Stempeln	200
	20.5.12 Dekoration der Oberfläche	200
	20.5.13 Seitliche Löcher	201
	20.5.14 Unregelmäßige Löcher	201
	20.5.15 Korrugatoren	201
	20.5.16 Spiralisierung	202
	20.5.17 Schäumen	202
	20.5.18 Extrudierte Schraubenlöcher	202
	20.5.19 Muffen und Heizelementschweißen	203
KAPITEL 21	Alternative Verarbeitungsmethoden für Thermoplaste	204
	21.1 Blasformen	204
	21.2 Rotationsformen	206
	21.3 Vakuumformen	207
KAPITEL 22	Vorgehensweise bei der Materialauswahl	209
	22.1 Wie wählen Sie das richtige Material für Ihr Entwicklungsprojekt?	209
	22.2 Entwicklungskooperation	210
	22.3 Festlegung des Anforderungsprofils	210
	22.4 Muss-Anforderungen	211
	22.5 Kann-Anforderungen	212
	22.6 Erstellung einer detaillierten Kostenanalyse	214
	22.7 Erstellung eines aussagekräftigen Prüfprogramms	215
KAPITEL 23	Anforderungen und Spezifikation von Kunststoffprodukten ..	216
	23.1 Hintergrundinformationen	216
	23.2 Losgröße	217
	23.3 Formteilgröße	218
	23.4 Toleranzanforderungen	218
	23.5 Gestaltung des Formteils	220
	23.6 Montage-Anforderungen	223
	23.7 Mechanische Belastung	223
	23.8 Chemische Beständigkeit	224
	23.9 Elektrische Eigenschaften	225
	23.10 Umweltauswirkungen	226
	23.11 Farbe	227
	23.12 Oberflächeneigenschaften	228
	23.13 Sonstige Eigenschaften	230
	23.14 Gesetzliche Anforderungen	231
	23.15 Anforderungen des Recyclings	232
	23.16 Kostenanforderungen	233

23.17	Anforderungsprofil: Checkliste	234
23.17.1	Hintergrundinformation	234
23.17.2	Batchgröße	235
23.17.3	Formteilgröße	235
23.17.4	Toleranzanforderungen	235
23.17.5	Formteilgestaltung	235
23.17.6	Montage-Anforderungen	235
23.17.7	Mechanische Belastung	235
23.17.8	Chemische Beständigkeit	235
23.17.9	Elektrische Eigenschaften	236
23.17.10	Umweltauswirkungen	236
23.17.11	Farbe	236
23.17.12	Oberflächeneigenschaften	236
23.17.13	Sonstige Eigenschaften	237
23.17.14	Gesetzliche Anforderungen	237
23.17.15	Recycling	237
23.17.16	Kosten	237

Konstruktionsregeln für thermoplastische Formteile 238 KAPITEL 24

24.1	Regel 1: Kunststoffe sind keine Metalle	239
24.2	Regel 2: Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Kunststoffen	240
24.2.1	Anisotropes Verhalten	241
24.2.2	Temperaturabhängiges Verhalten	241
24.2.3	Zeitabhängige Spannungs-Dehnungs-Kurve	242
24.2.3.1	Kriechen	242
24.2.3.2	Relaxation	242
24.2.4	Geschwindigkeitsabhängige Eigenschaften	243
24.2.5	Umweltabhängige Eigenschaften	244
24.2.6	Einfache Bauteilauslegung	244
24.2.7	Einfache Einfärbung	244
24.2.8	Einfache Montage	245
24.2.9	Recycling	245
24.3	Regel 3: Konstruieren im Hinblick auf das zukünftige Recycling ..	246
24.3.1	Zerlegung	246
24.3.2	Wiederverwendete Materialien	248
24.3.3	Kennzeichnung	248
24.3.4	Reinigung	249
24.4	Regel 4: Integration mehrerer Funktionen in einem Bauteil	249
24.5	Regel 5: Einhaltung einer gleichmäßigen Wanddicke	251
24.6	Regel 6: Vermeidung von scharfen Kanten	252
24.7	Regel 7: Verwendung von Rippen zur Erhöhung der Steifigkeit ...	254
24.7.1	Einschränkungen bei der Gestaltung von Rippen	254
24.7.2	Materialsparende Konstruktion	255
24.7.3	Vermeidung von Einfallstellen bei Rippen	255

24.8	Regel 8: Sorgfältige Positionierung und Dimensionierung des Anschnitts	255
24.8.1	Bindenähte	257
24.9	Regel 9: Vermeiden von engen Toleranzen	258
24.10	Regel 10: Auswahl eines geeigneten Montageverfahrens	259
KAPITEL 25	Verbindungstechniken für Thermoplaste	260
25.1	Verbindungstechniken, die die Demontage erleichtern	260
25.2	Integrierte Schnappverbindungen	261
25.3	Dauerhafte Verbindungstechniken	262
25.4	Ultraschallschweißen	262
25.5	Vibrationsschweißen	263
25.6	Rotationsschweißen	264
25.7	Heizelementschweißen	265
25.8	Infrarotschweißen	266
25.9	Laserschweißen	266
25.10	Nieten	268
25.11	Kleben	269
KAPITEL 26	Der Spritzgießprozess	270
26.1	Analyse des Spritzgießprozesses	270
26.2	Kontaktangaben	272
26.3	Informationsbereich	272
26.4	Materialinformation	273
26.5	Angaben zur Maschine	274
26.6	Angaben zum Werkzeug	276
26.7	Trocknung	278
26.8	Angaben zur Verarbeitung	280
26.9	Temperaturen	281
26.10	Druck, Einspritzgeschwindigkeit und Schneckendrehzahl	286
26.11	Nachdruck	287
26.12	Einspritzphase	289
26.13	Schneckendrehzahl	290
26.14	Zeit- und Wegeinstellungen	292
KAPITEL 27	Prozessparameter für das Spritzgießen	297
KAPITEL 28	Problemlösung und Qualitätsmanagement	301
28.1	Höhere Qualitätsansprüche	301
28.2	Analytische Fehlerbehebung	301
28.2.1	Definition des Problems	302
28.2.2	Definition der Abweichung	302

28.3	Eingrenzung eines Problems	303
28.3.1	Einteilung von Problemen	304
28.3.2	Problemanalyse	306
28.3.3	Brainstorming	307
28.3.4	Überprüfung der Ursachen	308
28.3.5	Planung der zu ergreifenden Maßnahmen	308
28.4	Statistische Versuchsplanung (Statistical Design of Experiments – DOE)	309
28.4.1	Faktorielle Versuchsplanung	309
28.5	Fehler- Möglichkeits- und Einflussanalyse – FMEA	312
28.5.1	Allgemeine Konzepte der FMEA	314

Fehlersuche – Ursachen und Auswirkungen 316

KAPITEL 29

29.1	Probleme beim Spritzgießen	316
29.2	Füllgrad	318
29.2.1	Teilfüllungen – Das Formteil ist nicht vollständig gefüllt	318
29.2.2	Gratbildung	319
29.2.3	Einfallstellen	319
29.2.4	Hohlräume oder Poren	320
29.3	Oberflächenfehler	321
29.3.1	Brandflecken	321
29.3.1.1	Entfärbung, dunkle Schlieren oder Materialabbau	321
29.3.1.2	Schwarze Stippen	321
29.3.1.3	Spliss oder Silberschlieren (an manchen Stellen der Oberfläche)	322
29.3.1.4	Diesel-Effekt – eingeschlossene Luft	323
29.3.2	Spliss oder Silberschlieren (auf der gesamten Oberfläche)	324
29.3.3	Farbschlieren – Schlechte Farbverteilung	324
29.3.4	Farbschlieren – Ungünstige Pigmentorientierung	325
29.3.5	Oberflächenglanz – Matte und glänzende Oberflächenabweichungen	325
29.3.6	Oberflächenglanz – Corona-Effekt	326
29.3.7	Spliss, Streifen und Blasen	326
29.3.8	Glasfaserschlieren	327
29.3.9	Bindenähte	327
29.3.10	Freistrahlbildung	328
29.3.11	Delaminierung	329
29.3.12	Schallplattenrillen (Orangenschalenhauteffekt)	329
29.3.13	Kalter Pfropfen	330
29.3.14	Auswerfermarkierungen	330
29.3.15	Ölflecken – braune oder schwarze Stippen	331
29.3.16	Wasserflecken	331
29.4	Geringe mechanische Festigkeit	332
29.4.1	Blasen oder Hohlräume im Inneren des Formteils	332
29.4.2	Risse	332
29.4.3	Unaufgeschmolzenes Material	333

29.4.4	Versprödung	334
29.4.5	Rissbildung	334
29.4.6	Probleme mit Mahlgut	335
29.5	Probleme mit der Maßhaltigkeit	336
29.5.1	Fehlerhafte Schwindung	336
29.5.2	Unrealistische Toleranzen	337
29.5.3	Verzug	338
29.6	Produktionsprobleme	339
29.6.1	Formteil haftet in der Kavität	339
29.6.2	Formteil haftet auf dem Kern	339
29.6.3	Formteil haftet an den Auswerferstiften	340
29.6.4	Anguss haftet im Werkzeug	341
29.6.5	Fadenbildung	342
KAPITEL 30	Statistische Prozesskontrolle (SPC)	343
30.1	Warum SPC?	343
30.2	Begriffe der SPC	344
30.2.1	Normalverteilung (Gauß-Verteilung)	344
30.3	Standardabweichungen	344
30.3.1	Einfache Standardabweichung	344
30.3.2	Sechsfache Standardabweichung (Six Sigma)	345
30.3.3	Regelgrenzen	345
30.3.4	Zielwert	347
30.3.5	Zielwert Zentrierung (Target Value Centering, TC)	348
30.3.6	Maschinenfähigkeit (Cm)	349
30.3.7	Maschinenfähigkeitsindex (CmK)	349
30.3.8	Prozessfähigkeit (Cp)	350
30.3.9	Prozessfähigkeitsindex (Cpk)	350
30.3.10	Sechs wichtige Faktoren	351
30.3.11	Maschinenfähigkeit	351
30.3.12	Prozessfähigkeit	352
30.4	Anwendung der SPC in der Praxis	352
30.4.1	Software	352
30.4.2	Prozessdatenüberwachung	353
KAPITEL 31	Internetadressen	355
	Index	357

Vorwort

Seit vielen Jahren hatte ich die Idee, ein Buch über Spritzgießen zu schreiben, da ich mich mehr als 45 Jahre meines Berufslebens mit diesem Thema beschäftigt habe.

Als ich im Jahr 2009 in den Ruhestand trat, erhielt ich große Unterstützung durch meine Freunde Katarina Elnér-Haglund und Peter Schulz vom schwedischen Kunststoff-Magazin Plastforum. Sie baten mich, eine Reihe von Artikeln über Thermoplaste und deren Verarbeitung für diese Zeitschrift zu schreiben.

Zu dieser Zeit war ich auch an Ausbildungsprogrammen an der Lund University of Technology, der Königlichen Technischen Hochschule in Stockholm und bei einer Reihe von Industrieunternehmen in Schweden beteiligt. Im Rahmen dieser Tätigkeiten entstand dieses Buch.

Mein Ziel lag darin, so zu schreiben, dass jeder das Buch verstehen kann, unabhängig von seinem Vorwissen über Kunststoffe. Das Buch verfolgt einen praktischen Ansatz mit seinen zahlreichen Bildern und kann sowohl an Universitäten und in weiterführenden Schulen als auch in der betrieblichen Ausbildung und zum Selbststudium verwendet werden. In einigen Kapiteln gibt es Hinweise auf Excel-Arbeitsblätter, die von meiner Website kostenlos heruntergeladen werden können: www.brucon.se.

Zusätzlich zu den oben genannten Personen geht mein herzlicher Dank an meine Frau Ingelöv, die große Geduld aufbrachte, wenn ich völlig in der „wunderbaren Welt der Kunststoffe“ verschwand und das Buch anschließend Korrektur gelesen hat; sowie an meinen Bruder Hans-Peter, der unzählige Stunden mit der Feinabstimmung der Bilder usw. verbracht hat; und an meinen Schwiegersohn Stefan Bruder, der den Inhalt des Buches geprüft hat und zahlreiche wertvolle Kommentare eingebracht hat.

Ich möchte auch meinem früheren Arbeitgeber DuPont Performance Polymers danken und vor allem meinen Freunden und ehemaligen Managern Björn Hedlund und Stewart Daykin, die mich bei meiner Karriere als Trainer förderten, bis ich mein Ziel und Traumjob des „Leiters der globalen technischen Ausbildung“ erreicht hatte. Sie haben ebenfalls mit vielen Informationen und zahlreichen wertvollen Bildern in diesem Buch beigetragen.

Ich möchte mich auch herzlich bei meinen Freunden und Geschäftspartnern bei allen Ausbildungsprogrammen in den letzten Jahren bedanken, die mich unterstützt haben und vielen wertvolle Anmerkungen, Informationen und Bilder zu diesem Buch beigetragen haben. Die vollständige Liste wäre sehr lang, aber einige von ihnen sind in Kapitel 31 in diesem Buch zu finden.

Ulf Bruder

Karlskrona, Schweden, Juni 2016

Polymere und Kunststoffe

Manchmal stellt sich die Frage: Was ist eigentlich der Unterschied zwischen dem Begriff Polymer und dem Begriff Kunststoff? Das Wort „Polymer“ kommt aus dem Griechischen – „Poly“ bedeutet viele, und „Meros“ bedeutet Teil. Der Begriff Polymer benennt also die Gruppe aller Stoffe, die aus vielen sich wiederholenden Grundbausteinen (Monomere) bestehen, Polymere sind organische Makromoleküle. Die Reaktion die ein Polymer bildet wird Polymerisation genannt.

Polymere die mit einem zusätzlichen Stoff (Additive) zu einem Werkstoff verarbeitet wurden bezeichnet man dann als Kunststoffe. Diese Zusatzstoffe geben dem Kunststoff die gewünschten Eigenschaften: z. B. Farbigkeit, Verarbeitbarkeit, Dichte.

Kunststoffe werden in drei Gruppen eingeteilt: die Thermoplaste, die Duroplaste und die Elastomere.

(Nach: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2013)

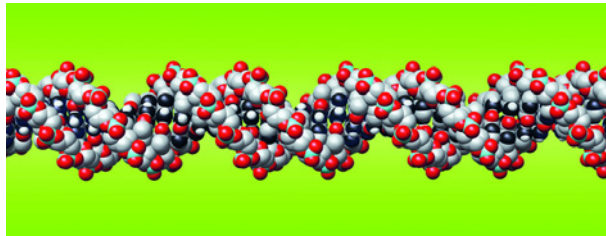


Bild 1.1 Polymere sind große Makromoleküle, in denen sich Monomermoleküle zu langen Ketten verbinden. In einer einzelnen Polymerkette können sich mehrere Tausend Monomermoleküle befinden.



Bild 1.2 Bernstein ist ein natürliches Polymer. Das Insekt in diesem Stein wurde vor mehr als 50 Millionen Jahren im Harz eines Nadelbaums eingefangen – dies sollte bedacht werden, wenn die Zersetzung bestimmter Polymere in der Natur betrachtet wird.

Die meisten Polymere werden synthetisch hergestellt, aber es gibt auch natürliche Polymere wie Naturkautschuk und Bernstein, die von der Menschheit seit Tausenden von Jahren verwendet werden.

Auch Proteine, Nukleinsäuren und DNA gehören zu den natürlichen Polymeren. Cellulose, die Hauptkomponente in Holz und Papier, ist ebenfalls ein natürliches Polymer.

Mit anderen Worten, Kunststoff ist ein synthetisch hergestelltes Material aus Monomer-Molekülen, die sich zu langen Ketten verbinden. Wenn die Polymerkette nur aus einem Monomer zusammengesetzt ist, wird das Polymer als Homopolymer bezeichnet. Wenn es mehrere Arten von Monomeren in der Kette gibt, wird das Polymer Copolymer genannt.

Ein Beispiel für einen Kunststoff, der sowohl als Homopolymer als auch als Copolymer auftritt, ist Polyoxymethylen (POM). POM besteht hauptsächlich aus dem Monomer Formaldehyd. Die Bausteine (Atome) von Formaldehyd sind Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff.

Die meisten Kunststoffmaterialien bestehen aus organischen Monomeren, aber in einigen Fällen können sie auch aus anorganischen Säuren bestehen. Ein Beispiel für ein anorganisches Polymer ist Silikonharz. Es besteht aus Polysiloxanen, wobei die Kette aus Silizium- und Sauerstoffatomen besteht.

Kohlenstoff und Wasserstoff sind die anderen dominierenden Elemente bei Kunststoffen. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Silizium (Si) bestehen Kunststoffe typischerweise aus fünf weiteren Elementen: Stickstoff (N), Fluor (F), Phosphor (P), Schwefel (S) und Chlor (Cl).

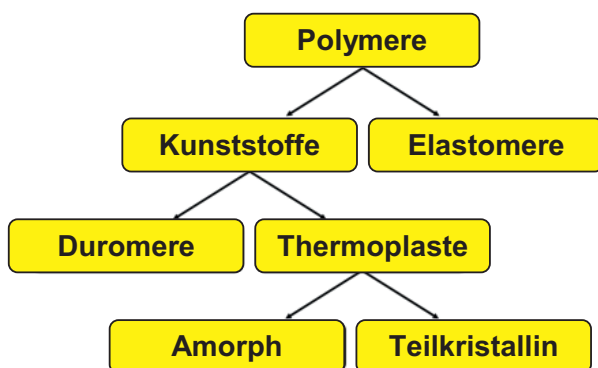


Bild 1.3 Nach diesem Schema werden in der Regel die synthetischen Polymere in Kautschuk und Kunststoff unterteilt, mit den Untergruppen Duomere und Thermoplaste. Die Thermoplaste sind wiederum in amorphe und teilkristalline Kunststoffe unterteilt.



Bild 1.4 Naturkautschuk ist ein natürliches Polymer, das der Mensch seit Tausenden von Jahren verwendet. Im Jahre 1839 erfand der Amerikaner Charles Goodyear die Vulkanisation. Bei diesem Vernetzungsprozess wird der Naturkautschuk mit Schwefel vermischt, wobei sich die Molekülketten unter Hitze und Druck vernetzen. Dieser Prozess verbessert die Eigenschaften des Kautschuks erheblich.

Mit einem reinen Polymer wird äußerst selten gearbeitet. In der Regel werden verschiedene Additive (Modifikatoren) verwendet, um die Materialeigenschaften zu beeinflussen. Zu den üblichen Additiven gehören:

- Oberflächengleitmittel (leichteres Auswerfen)
- Wärmestabilisatoren (verbessertes Prozessfenster)
- Farbpigmente
- Verstärkungsstoffe wie Glas- oder Kohlenstofffasern (höhere Steifigkeit und Festigkeit)
- Schlagzähmodifikatoren
- UV-Modifikatoren (z. B. zum Schutz vor UV-Licht)
- Flamschutzmittel
- Antistatika
- Treibmittel (z. B. EPS, geschäumtes Polystyrol)

1.1 Duroplaste

Bei Duroplasten treten – wie bei Kautschuk – Bindungen zwischen den Molekülketten auf. Dies wird als „Vernetzung“ bezeichnet. Diese Querverbindungen sind so stark, dass sie bei Hitze nicht brechen – daher schmilzt das Material nicht.



Bild 1.5 So genannte Zwei-Komponenten-Klebstoffe kommen häufig im Haushalt zum Einsatz. Dabei werden die beiden Komponenten miteinander gemischt, um eine chemische Vernetzungsreaktion auszulösen, bei der das Material aushärtet. Eine der Komponenten wird daher als „Härter“ bezeichnet. In diesem Fall erfolgt die Reaktion bei Atmosphärendruck und wird als Niederdruckreaktion bezeichnet.



Bild 1.6 Polyurethane können als Duroplast oder als Thermoplast auftreten. Sie können auch hart oder weich sein, wie in den hier dargestellten Schaumblöcken.

Duroplaste treten in flüssiger und in fester Form auf, in einigen Fällen können sie mit Hochdruckverfahren verarbeitet werden. Zu den gebräuchlichen Duroplasten gehören:

- Phenolharze (Anwendung als Griffe für Kochtöpfe)
- Melaminharze (Anwendung in Kunststoff-Laminaten)
- Epoxidharze (Anwendung in Zweikomponenten-Klebstoffen)
- Ungesättigte Polyesterharze (Anwendung im Bootsbau)
- Vinylester (Anwendung in der Automobilkarosserie)
- Polyurethan (Anwendung als Schuhsohlen und Schaum)

Viele Duroplaste verfügen über hervorragende elektrische Eigenschaften und halten hohen Einsatztemperaturen stand. Sie erreichen eine hohe Steifigkeit und Festigkeit, wenn sie mit Glasfasern, Kohlenstofffasern oder Kevlar-Fasern verstärkt sind. Die hauptsächlichen Nachteile sind langsamere Verarbeitungsverfahren und Schwierigkeiten beim Recycling.

1.2 Thermoplaste

Thermoplastische Kunststoffe haben den Vorteil, dass sie schmelzen, wenn sie erhitzt werden. Sie sind einfach zu verarbeiten. Zu den zahlreichen Verarbeitungsverfahren gehören beispielsweise:

- Spritzgießen (das häufigste Verarbeitungsverfahren für Thermoplaste)
- Blasformmaschinen (für die Herstellung von Flaschen und Hohlkörpern)
- Extrusion (für Rohre, Schläuche, Profile und Kabel)
- Folienblasen (z. B. für Kunststoffbeutel)
- Rotationsformen (für große Hohlkörper wie Behälter, Bojen und Leitkegel)
- Vakuumformen (für Verpackungen, Paneele und Dachboxen)



Bild 1.7 Viele Haushalte sortieren ihren Müll, so dass Flaschen, Taschen, Folien und andere Kunststoffprodukte recycelt werden können.



Bild 1.8 Ausrangierte thermoplastische Produkte können recycelt werden. Diese Schallschutzzitter von Polyplank AB sind dafür ein hervorragendes Beispiel. [Foto: Polyplank AB]

Thermoplaste können mehrfach wieder eingeschmolzen werden. Es ist daher wichtig, Kunststoffprodukte nach Gebrauch wiederzuverwerten. Standardkunststoffe können in der Regel bis zu sieben Mal recycelt werden, bevor die Eigenschaften zu schlecht werden. Im Falle von technischen Thermoplasten und Hochleistungskunststoffen wird in der Regel maximal 30 % Regenerat empfohlen, damit die mechanischen Eigenschaften der Neuware nicht wesentlich beeinflusst werden. Wenn Kunststoffzyklate nicht für neue Produkte verwendet werden können, ist die energetische Verwertung durch Verbrennung oft eine geeignete Wahl. Es gibt allerdings noch eine andere Option, die als chemische Verwertung bezeichnet wird. Dieser Prozess hat sich aufgrund der hohen Kosten im Vergleich zu Neumaterial noch nicht durchgesetzt.

1.3 Amorphe und teilkristalline Kunststoffe

Wie in Bild 1.3 dargestellt, können Thermoplaste in Abhängigkeit von der Struktur in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden: amorph oder teilkristallin. Glas ist ebenfalls ein weitverbreitetes amorphes Material und Metalle haben eine kristalline Struktur. Ein amorpher Kunststoff erweicht wie Glas, wenn die Temperatur erhöht wird. Daher kann er im Thermoformen umgeformt werden.

Amorphe Materialien haben keinen exakten Schmelzpunkt – stattdessen wird die sogenannte Glasübergangstemperatur (T_g) verwendet, bei der die Molekülketten beginnen, sich zu bewegen. Teilkristalline Kunststoffe erweichen nicht in der gleichen Weise – stattdessen gehen sie am Schmelzpunkt (T_s) vom Feststoff zur Flüssigkeit über.



Bild 1.9 Thermoplastisches Polyester (PET) kann in amorpher (Softdrink-Flaschen) oder teilkristalliner Form (Bügeleisen) eingesetzt werden.

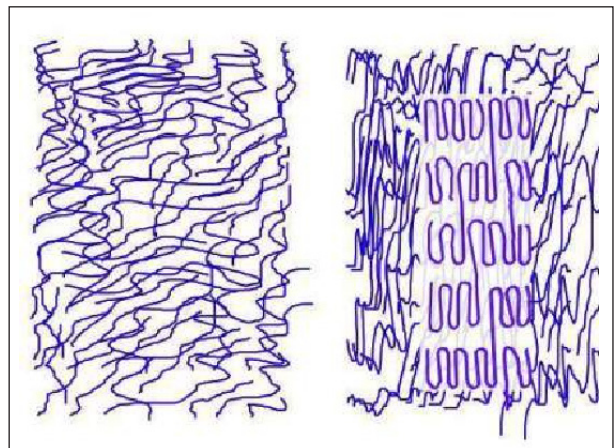


Bild 1.10 Die amorphe Struktur ist völlig ungeordnet, während sich die Molekülketten in teilkristallinen Kunststoffen in geordneten Schichten (Lamellen) ausrichten.

In der Regel kommen teilkristalline Kunststoffe mit erhöhten Temperaturen besser zurecht als amorphe Kunststoffe. Außerdem verfügen sie über eine bessere Dauerfestigkeit und Chemikalienbeständigkeit. Sie sind auch unempfindlicher gegen Spannungsrissbildung. Teilkristalline Kunststoffe sind eher wie Metall und haben eine bessere Elastizität als amorphe Kunststoffe. Amorphe Kunststoffe können

vollkommen transparent sein und lassen sich im Thermoformen verarbeiten. Sie zeigen im Allgemeinen weniger Schwindung und weniger Verzug als teilkristalline Kunststoffe.

Es ist wichtig, dass die Konstrukteure und Verarbeiter von Kunststoffprodukten wissen, welcher Materialtyp verwendet wird, da amorphe und teilkristalline Werkstoffe sich unterschiedlich verhalten, wenn sie erhitzt werden, und unterschiedliche Prozessparameter erfordern.

Spezifisches Volumen

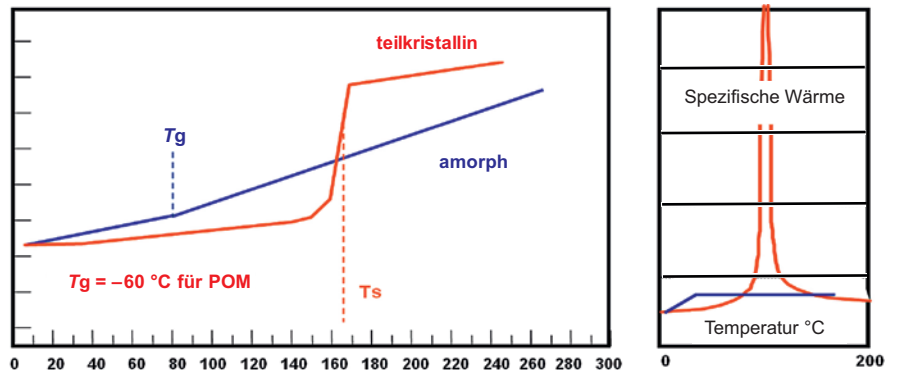


Bild 1.11 Bei Erwärmung erhöht sich das spezifische Volumen des amorphen Materials linear über und unter der Glasübergangstemperatur (T_g). Das teilkristalline Material hat ebenfalls eine Glasübergangstemperatur, da Kunststoffe nie zu 100% kristallin sind. Im Bereich des Schmelzpunkts (T_s) erhöht sich das spezifische Volumen deutlich. Für POM liegt dies bei etwa 20%, was die große Schwindung beim Spritzgießen erklärt. Amorphe Materialien haben keinen Schmelzpunkt und eine deutlich geringere Schwindung. Die Energie, die für eine Temperaturerhöhung um ein Grad erforderlich ist, bleibt oberhalb der T_g des amorphen Materials konstant (rechtes Bild). Das teilkristalline Material benötigt eine erhebliche höhere Energie, um den Schmelzpunkt zu erreichen – die sogenannte spezifische Wärme, um das Material vom festen in den flüssigen Zustand zu überführen. Dies führt zu Problemen beim Spritzgießen, da es einen großen Energieaufwand erfordert, wenn teilkristalliner Kunststoff in der Düse oder im Heißkanalwerkzeug erstarrt. Manchmal ist eine Lötlampe nötig, um die Propfen in der Zylinderdüse aufzuschmelzen.

Standardkunststoffe

2.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen ist ein teilkristalliner Kunststoff und wird häufig mit seiner Abkürzung PE bezeichnet. Es ist der am häufigsten genutzte Kunststoff – mehr als 60 Millionen Tonnen werden jährlich weltweit produziert. Polyethylen mit niedriger Dichte (LDPE) wurde im Jahr 1939 vom britischen Chemiekonzern ICI auf dem Markt eingeführt.



Chemische Grundlagen:

Polyethylen hat eine sehr einfache Struktur und besteht nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Es gehört zu den so genannten Polyolefinen. Bei diesen Polymeren haben die Monomere eine Doppelbindung und sind sehr reaktiv. Das chemische Symbol für Ethylen, das Monomer des PE, ist C_2H_4 oder $CH_2=CH_2$, dabei steht das Zeichen „=“ für die Doppelbindung. Polyethylen kann graphisch wie folgt dargestellt werden:

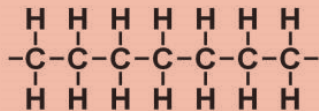


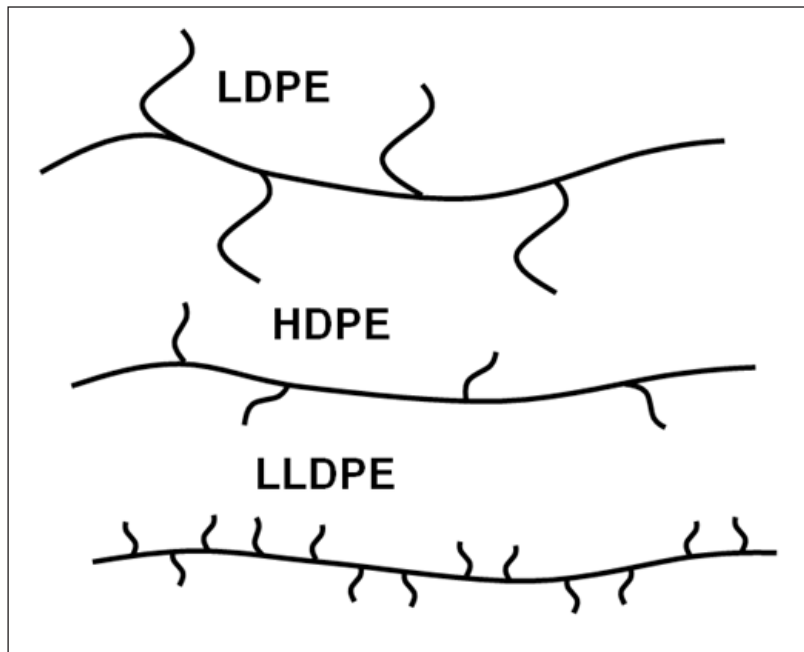
Bild 2.1 Die umfangreiche Verwendung als Verpackungsmaterial ist ein Grund dafür, dass PE sich zum wichtigsten Standardkunststoff entwickelt hat. Kunststoffbeutel bestehen aus LDPE.

2.1.1 Einteilung

Polyethylen kann in Abhängigkeit von der Dichte und der Verzweigung der Polymerketten in verschiedene Gruppen eingeteilt werden:

- UHMWPE PE mit ultrahohem Molekulargewicht
- HDPE PE mit hoher Dichte
- MDPE PE mit mittlerer Dichte
- LLDPE lineares PE mit niedriger Dichte
- LDPE PE mit niedriger Dichte
- PEX Vernetztes PE

Bild 2.2 Bei der Polymerisation von Ethylen zu Polyethylen gibt es verschiedene Verfahren, die zu mehr oder weniger Verzweigungen an den Molekülketten führen. Weniger Seitenketten erhöhen die Kristallinität, das Molekulargewicht und die Dichte, da die Ketten dichter gepackt werden können. HDPE hat wenige oder keine Seitenketten und wird auch als lineares Polyethylen bezeichnet.



2.1.2 Eigenschaften von Polyethylen

- | | |
|--|--|
| + Geringer Materialpreis und geringe Dichte | + Ausgezeichnete Verschleißfestigkeit (UHMWPE) |
| + Hervorragende chemische Beständigkeit | + Leicht einzufärben |
| + Geringe Feuchtigkeitsaufnahme | - Steifigkeit und Zugfestigkeit |
| + Für Lebensmittel zugelassene Sorten sind verfügbar | - Nicht für Temperaturen über 80 °C geeignet |
| + Hohe Elastizität bis unter -50 °C | - Schwierig zu lackieren |

Die mechanischen Eigenschaften hängen stark vom Verzweigungsgrad, der Kristallinität und der Dichte ab, also vom PE-Typ.

2.1.3 Recycling

Polyethylen ist eines der am häufigsten recycelten Kunststoffmaterialien. Viele der Beutel, wie Müllbeutel oder Tragetaschen, die wir verwenden, sind aus recyceltem Polyethylen. Wenn das Recycling-Material zur Energieerzeugung verwendet wird, ist der Energiegehalt vergleichbar mit Öl.

Beim Recycling wird die folgende Codierung verwendet:



2.1.4 Anwendungsgebiete

- 1) UHMWPE wird hauptsächlich durch Extrusion zu Rohren, Folien oder Platten verarbeitet.



Bild 2.3 Gleitschiene.

UHMWPE hat ausgezeichnete Reibungs- und Verschleißigenschaften. Es wird für anspruchsvolle industrielle Anwendungen wie diese Gleitschiene (weiß) für ein Förderband aus POM (grau) eingesetzt.



Bild 2.4 Mülltonnen.

HDPE ist kostengünstig herzustellen und einfach zu verarbeiten, auch bei großen Formteilen.

- 2) HDPE wird zum Spritzgießen, Blasformen, Extrusion, Folienblasen und Rotationsformen verwendet.



Bild 2.5 Tiegel und Flaschen.

HDPE eignet sich für das Blasformen und erfüllt die Anforderungen der Lebensmittelindustrie.



Bild 2.6 Schläuche.

HDPE eignet sich für die Extrusion. Ein Wasserschlauch ist zäh und stabil, für Trinkwasser zugelassen, und er kann dem Wasserdruck über einen langen Zeitraum standhalten.

3) LDPE wird für das Folienblasen und die Extrusion verwendet.

Ein großer Teil des hergestellten Polyethylens wird für das Folienblasen verwendet. Wenn die Folie weich und flexibel ist, besteht sie entweder aus LDPE oder LLDPE. Wenn sie raschelt wie die kostenlosen Tüten im Supermarkt, besteht sie wahrscheinlich aus HDPE. LLDPE wird auch verwendet, um die Festigkeit von LDPE-Folien zu verbessern.



Bild 2.7 Müllsäcke.

LDPE eignet sich hervorragend für das Folienblasen. Es ist das am häufigsten verwendete Material für Tüten, Kunststoffsäcke und Baufolien.



Bild 2.8 Kabelummantelungen.

LDPE wird für die Extrusion von Ummantelungen für Hochspannungskabel verwendet.

4) PEX

Vernetztes Polyethylen wird hauptsächlich bei der Extrusion von Rohren verwendet. Die Vernetzung verbessert die Kriechbeständigkeit und die Eigenschaften bei hohen Temperaturen.



Bild 2.9 Schläuche aus PEX widerstehen hohen Temperaturen (120 °C) und Drücken. Sie werden für die Warmwasserversorgung von Spül- oder Waschmaschinen eingesetzt.

Ethylen lässt sich auch mit polaren Monomeren copolymerisieren. Dies führt zu viskosen Produkten (z. B. Schmelzkleber), Folien mit hoher Festigkeit oder schlagzähem Hartschalen (z. B. Golfbälle).

Ein verbreitetes Copolymer ist EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat). Durch Variation der Konzentration des Vinylacetats (VA) von 2,5 bis 95 % können die Eigenschaften beeinflusst werden, so dass eine Reihe von verschiedenen Materialtypen entstehen. Ein höherer VA-Gehalt erhöht die Transparenz und die Zähigkeit.

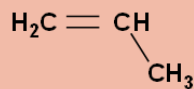
Klebstoffe, Teppichunterlagen, Kabelisolierungen, Trägermaterialien für Farbmaterbatches, Stretchfolien und Beschichtungen für Pappe und Papier sind typische EVA-Anwendungen.

2.2 Polypropylen (PP)

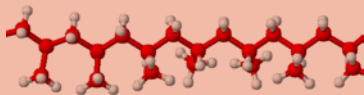
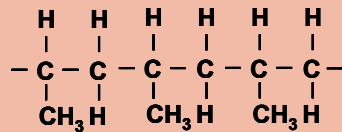


Chemische Grundlagen:

PP hat eine einfache Struktur und besteht wie PE nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Es gehört ebenfalls zu den so genannten Polyolefinen. Polypropylen besteht aus einer Kette aus Kohlenstoffatomen, wobei jedes zweite Kohlenstoffatom mit zwei Wasserstoffatomen und jedes andere mit einem Wasserstoffatom und einer Methylgruppe verbunden ist. Die Strukturformel des Monomers wird wie folgend dargestellt:



Polypropylen kann graphisch wie folgt dargestellt werden:



Polypropylen ist ein teilkristalliner Kunststoff und wird üblicherweise als PP bezeichnet. nach LDPE ist PP mengenmäßig der zweitwichtigste Kunststoff auf dem Markt.

Polypropylen wurde 1954 von den beiden Forschern Ziegler und Natta fast gleichzeitig und unabhängig voneinander entdeckt. Im Jahr 1963 erhielten sie gemeinsam den Nobelpreis.

Das italienische Chemieunternehmen Montecatini brachte das Material im Jahr 1957 erstmals auf den Markt.

Die Polymerisation von Polypropylen kann sowohl die Kristallinität als auch die Größe der Moleküle beeinflussen. Es können auch Copolymere aus Polypropylen mit anderen Monomeren (z. B. Ethylen) hergestellt werden.

In Abhängigkeit von der Polymerisationsmethode kann Polypropylen als Homopolymer, Random-Copolymer oder Block-Copolymer auftreten. Polypropylen kann auch mit Elastomeren (beispielsweise EPDM) vermischt oder mit Talkum (Kreide) gefüllt bzw. mit Glasfasern verstärkt werden. Auf diese Weise lassen sich mehr verschiedene Typen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften als mit jedem anderen Kunststoff erzeugen. Bestimmte Polypropylen-Typen können bei einer Dauertemperatur von 100 °C und bei Spitzentemperaturen von bis zu 140 °C eingesetzt werden. Daher können sie als technische Kunststoffe eingestuft werden.