

Christian Bonten

Kunststofftechnik

Einführung und Grundlagen

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Inhalt

I

i
,
I

Vorwort	V
Vorwort zur 2. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	V
Der Autor: Prof. Christian Bonten	IX
Hinweise zur Benutzung des Buches	XI
1 Einleitung	1
1.1 Kunststoff – Werkstoff der Moderne	1
1.2 Einsatzgebiete von Kunststoffen	5
1.3 Kunststoffe und Design	8
1.4 Literaturverzeichnis	11
2 Grundlagen	13
2.1 Von Monomer zu Polymer – Grundlagen der Polymerchemie	13
2.1.1 Herkunft der Monomere	13
2.1.2 Polymersynthese	16
2.1.2.1 Polymerisation	16
2.1.2.2 Copolymerisation (Sonderform der Polymerisation)	19
2.1.2.3 Polykondensation	20
2.1.2.4 Polyaddition	21
2.1.3 Die Molmasse von Polymeren	22
2.1.4 Bindungskräfte und Brown'sche Molekularbewegung	28
2.1.4.1 Innermolekulare chemische Bindungen	28
2.1.4.2 Intermolekulare physikalische Bindungen	30
2.1.4.3 Brown'sche Molekularbewegung – Beweglichkeit der Polymerketten	34
2.1.5 Mechanismen der Erstarrung und Unterteilung der Polymere ...	35

2.1.6	Primärstruktur von Polymeren: Konstitution und Konfiguration	38
2.1.7	Sekundär- und Tertiärstrukturen von Polymeren: Konformation	40
2.1.7.1	Amorphe Strukturen	41
2.1.7.2	Kristalline Strukturen	42
2.1.7.3	Einfluss der Primärstruktur	43
2.1.7.4	Überstrukturen	46
2.1.8	Polymere – Rohstoff nicht nur für Kunststoffe	49
2.2	Grundlagen der Kraftübertragung	50
2.2.1	Wichtige Begriffe	51
2.2.1.1	Festigkeit	51
2.2.1.2	Steifigkeit	51
2.2.1.3	Zähigkeit	51
2.2.1.4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme	52
2.2.2	Zustandsbereiche von Kunststoffen	55
2.2.2.1	Glasübergangstemperatur T_g	55
2.2.2.2	Kristallitschmelztemperatur T_m	56
2.2.2.3	Zustandsbereiche vernetzter Polymere	57
2.2.3	Mechanische Ersatzmodelle	59
2.3	Kunststoff und Kunststofftechnik – Begriffsbestimmung	63
2.4	Literaturverzeichnis	65
3	Kunststoff-Werkstofftechnik	69
3.1	Verhalten in der Schmelze – Fließeigenschaften und deren Messung ..	70
3.1.1	Strömungsmechanische Grundlagen	71
3.1.2	Einflüsse auf das Fließverhalten	78
3.1.3	Das Konzept der repräsentativen Viskosität	84
3.1.4	Dehnung von Schmelze	86
3.1.5	Strangaufweitung und Schrumpf	89
3.1.6	Rheometrie – die Messung der Fließeigenschaften	91
3.1.6.1	Die Messung des Schmelzemassefließrate MFR	92
3.1.6.2	Das Hochdruck-Kapillarrheometer	93
3.1.6.3	Rotationsrheometer	95
3.1.6.4	Dehnrheometer	100
3.2	Verhalten als Festkörper – Festkörpereigenschaften und deren Messung	101
3.2.1	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	102
3.2.1.1	Der Zugversuch	102
3.2.1.2	Der Schnellzerreißversuch	105
3.2.1.3	Zeit- und Temperatureinfluss auf das mechanische Verhalten	107

3.2.1.4	Der Zeitstandversuch	110
3.2.1.5	Der Schwingversuch	111
3.2.1.6	Der Biegeversuch	114
3.2.2	Physikalische Eigenschaften	117
3.2.2.1	Elektrische Eigenschaften	117
3.2.2.2	Magnetische Eigenschaften	119
3.2.2.3	Optische Eigenschaften	120
3.2.2.4	Akustische Eigenschaften	128
3.2.3	Werte für den Wärme- und Stoffaustausch	130
3.2.3.1	Spezifische Enthalpie h	130
3.2.3.2	Spezifische Wärmekapazität c_p	132
3.2.3.3	Dichte ρ	135
3.2.3.4	Wärmeleitfähigkeit λ	136
3.2.3.5	Wärmeausdehnungskoeffizient α	139
3.2.3.6	Temperaturleitfähigkeit a	140
3.2.3.7	Wärmeeindringzahl b	142
3.2.3.8	Stofftransport	142
3.3	Beeinflussung der Eigenschaften durch Zusatzstoffe	147
3.3.1	Verstärkungsstoffe – Aktive Zusatzstoffe	147
3.3.1.1	Die Fasern und das Prinzip der Verstärkung	151
3.3.1.2	Die Aufgaben der Matrix	154
3.3.1.3	Kraftübertragung des Faserkunststoffverbunds	155
3.3.1.4	Defekte in Faserkunststoffverbunden	159
3.3.1.5	Nanopartikel als aktive Zusatzstoffe	163
3.3.2	Funktions-Zusatzstoffe – Additive	165
3.3.2.1	Viskositätsverändernde Zusatzstoffe – Fließhilfsmittel ..	165
3.3.2.2	Weichmacher	166
3.3.2.3	Zumischung anderer Polymere – Bildung von Polymerblends	168
3.3.2.4	Schlagzähmodifizierer	168
3.3.2.5	Keimbildner (Nukleierungsmittel)	170
3.3.2.6	Haftvermittler	171
3.3.2.7	Leitfähige Zusatzstoffe	172
3.3.3	Füllstoffe – Inaktive Zusatzstoffe	173
3.4	Von Polymer zu Kunststoff – Einführung in die Kunststoff-Aufbereitung	174
3.4.1	Der Doppelschneckenextruder	175
3.4.2	Verfahrenstechnik	176
3.4.3	Charakteristische Kennwerte	180
3.4.4	Zusatzaggregate	181

3.5	Prozess, Struktur, Eigenschaften – Beeinflussung im Verarbeitungsprozess	184
3.5.1	Eigenspannungen	185
3.5.2	Orientierung von Makromolekülen	186
3.5.3	Orientierung von Fasern	189
3.5.4	Kristallisation	190
3.5.5	Bildung einer Makrostruktur: Schäumen von Kunststoffen	190
3.6	Veränderungen mit der Zeit – Einblick in die Alterung von Kunststoffen	192
3.6.1	Alterungsursachen	193
3.6.2	Alterungsvorgänge	194
3.6.2.1	Mechanische Alterungsmechanismen	194
3.6.2.2	Physikalische Alterungsmechanismen	195
3.6.2.3	Chemische Alterungsmechanismen	197
3.6.2.4	Wirkweise von Alterungstabilisatoren	199
3.6.3	Alterungserscheinungen	200
3.6.4	Charakterisierung des Alterungsfortschritts	201
3.7	Kurzdarstellung einiger wichtiger Kunststoffe	204
3.8	Polyethylen (PE)	208
3.9	Polypropylen (PP)	209
3.10	Ethylen-Propylen-(Dien)-Copolymere (EPDM)	210
3.11	Polyvinylchlorid (PVC)	213
3.12	Polystyrol (PS)	215
3.13	Styrol-Butadien-Styrol-Copolymere (SBS)	217
3.14	Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN)	218
3.15	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS)	221
3.16	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere (ASA)	222
3.17	Polyamid (PA)	225
3.18	Polybutylenterephthalat (PBT)	231
3.19	Polyethylenterephthalat (PET)	232
3.20	Polycarbonat (PC)	235
3.21	Polymethylmethacrylat (PMMA)	237
3.22	Polyoxymethylen (POM)	239
3.23	Polytetrafluorethylen (PTFE)	242
3.24	Polyetheretherketon (PEEK)	243
3.25	Polyethersulfon (PES) und Polysulfon (PSU)	245

3.26 Polyphenylensulfid (PPS)	247
3.27 Cellulosederivate	249
3.28 Polyhydroxyalkanoate (PHA)	251
3.29 Polylactid (PLA)	252
3.30 Thermoplastisches Polyurethan (TPE-U, auch TPU)	254
3.31 Polyurethan (PUR)	255
3.32 Epoxidharze (EP)	256
3.33 Melaminformaldehydharz (MF)	258
3.34 Phenol-Formaldehyd- oder Phenolharz (PF)	259
3.35 Harnstoff-Formaldehydharz (UF)	260
3.36 Ungesättigtes Polyesterharz (UP)	261
3.37 Literaturverzeichnis	262

4 Kunststoff-Verarbeitungstechnik 265

4.1 Extrusion	266
4.1.1 Extruderschnecke und Zylinder	267
4.1.2 Der Hochleistungsextruder Helibar®	275
4.1.3 Rohr- und Profilextrusion	277
4.1.4 Flachfolien- und Plattenextrusion	283
4.1.5 Schlauch- und Blasfolienextrusion	284
4.1.6 Extrusions-Blasformen	286
4.1.7 Co-Extrusion	287
4.2 Spritzgießen	289
4.2.1 Der Spritzgießprozess	292
4.2.2 Das Plastifizieraggregat	295
4.2.3 Die Schließeinheit mit Spritzgießwerkzeug	297
4.2.3.1 Rheologische Auslegung	300
4.2.3.2 Thermische Auslegung	302
4.2.4 Einfluss des Spritzgießprozesses auf die Eigenschaften des Bauteils	305
4.2.5 Vorstellung einiger Sonderverfahren	308
4.2.5.1 Spritzprägen	309
4.2.5.2 Thermoplastschaum-Spritzgießen	310
4.2.5.3 Kaskaden-Spritzgießen	311
4.2.5.4 Spritzgießcompoundieren	312
4.2.5.5 Mehr-Komponenten-Verfahren	313
4.2.5.6 Sandwich-Spritzgießen	315
4.2.5.7 Fluidinjektionstechniken	317

4.2.5.8	Hinterspritztechnik	318
4.2.5.9	Spritzstreck-Blasformen	320
4.2.5.10	Variotherme Werkzeugtemperierung	321
4.3	Verarbeitung von vernetzenden Kunststoffen	323
4.3.1	Pressen	325
4.3.2	Transferpressen	326
4.3.3	Spritzgießen	327
4.3.4	Verarbeitung von Polyurethan	328
4.4	Technologie der Faserkunststoffverbunde	333
4.4.1	Handlaminieren und Faserspritzen	334
4.4.2	Pressen von SMC und GMT	335
4.4.3	Pultrusion von Endlosfasern	338
4.4.4	Arbeiten mit Prepregs	340
4.4.5	Harzinjektionsverfahren	341
4.4.6	Dreidimensionale Faserkunststoffverbundstrukturen	343
4.5	Weiterverarbeitung	345
4.5.1	Thermoformen	345
4.5.2	Mechanische Bearbeitung von Kunststoffen	352
4.5.3	Schweißen	356
4.5.3.1	Heizelementschweißen	358
4.5.3.2	Ultraschallschweißen	362
4.5.3.3	Vibrationsreibschweißen	364
4.5.3.4	Laserschweißen	365
4.5.4	Kleben	366
4.5.5	Fügen durch Schnappverbindungen, Schrauben und Nieten	371
4.5.6	Beschichten von Kunststoffen	374
4.5.6.1	Beschichtete Bauteile	375
4.5.6.2	Beschichtungsverfahren	378
4.6	Literaturverzeichnis	382
5	Produktentwicklung mit Kunststoffen	385
5.1	Kunststoffe als Konstruktionswerkstoffe	386
5.1.1	Kunststoffspezifische Alleinstellungsmerkmale	386
5.1.2	Werkstoffvorauswahl	390
5.2	Geometrische Unterteilung von Produkten	392
5.2.1	Großflächige Produkte	392
5.2.2	Gehäuseartige Produkte	393
5.2.3	Behälterartige Produkte	394
5.2.4	Komplexe Produkte	394
5.2.5	Funktionsspezifische Produkte	395
5.2.6	Bedeutung für die Wahl des Verarbeitungsverfahrens	395

5.3	Konstruieren mit Kunststoffen	397
5.3.1	Anforderungen an Produkte und Funktionen	398
5.3.2	Nutzen der Gestaltungsfreiheit – Integration von Funktionselementen	401
5.3.3	Nutzung der Gestaltungsfreiheit – Erhöhung des Flächenträgheitsmoments	405
5.3.4	Werkstoffgerechtes Konstruieren	409
5.3.5	Fertigungsgerechtes Konstruieren	420
5.3.6	Beanspruchungsgerechtes Konstruieren	423
5.3.6.1	Dimensionierung gegen eine zulässige Spannung	426
5.3.6.2	Dimensionierung gegen eine kritische Dehnung	428
5.3.6.3	Dimensionierung gegen den Zeiteinfluss – Lebensdauervorhersage	431
5.3.7	Kurzzusammenfassung der kunststoffgerechten Konstruktion	434
5.4	Nutzen von Prototypen in der Produktentwicklung	436
5.4.1	Rapid Prototyping	436
5.4.1.1	Stereolithographie (SLA)	437
5.4.1.2	Selektives Lasersintern (SLS)	439
5.4.1.3	Laminated Object Manufacturing (LOM)	439
5.4.1.4	3-D-Printing (3-D-P)	440
5.4.1.5	Strangablegeverfahren (FDM oder FFF)	441
5.4.2	Rapid Tooling	443
5.4.2.1	Gießverfahren	444
5.4.2.2	Lasersintern	447
5.4.3	Wahl eines Prototypverfahrens	448
5.4.3.1	Anforderungen an den Prototyp	448
5.4.3.2	Protoypen für großflächige Produkte und für gehäuseartige Produkte	449
5.4.3.3	Protoypen für behälterartige Produkte	451
5.4.3.4	Protoypen für komplexe Produkte	452
5.5	Literaturverzeichnis	453

6 Kunststoffe und Umwelt 455

6.4	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	478
6.4.1	Herkunft des Begriffes der „Nachhaltigkeit“	478
6.4.2	Der Brundtland-Bericht und das Kyoto-Protokoll	478
6.4.3	Ressourcenschonung mit Kunststoffen	480
6.4.4	Regenerative Energieerzeugung mit Kunststoffen	485
6.5	Fazit	488
6.6	Literaturverzeichnis	489
A	Empfehlungen zur Abfassung einer Bachelor-/Masterarbeit am IKT	491
A.1	Unterschiedlicher Anspruch an eine Bachelor-, Master- und Doktorarbeit	491
A.2	Wissenschaftliche Methoden	492
A.2.1	Quellen-untersuchende Methoden	492
A.2.2	Theoretische Methoden	492
A.2.3	Empirische Methoden	493
A.3	Wissenschaftliche Arbeit	494
A.4	Bachelor- oder Masterarbeit	495
A.4.1	Zum Titel der Abschlussarbeit	495
A.4.2	Zum Inhalt der Arbeit	495
A.4.2.1	Zusammenfassung	496
A.4.2.2	Einleitung	496
A.4.2.3	Hauptteil	496
A.4.2.4	Schlussbemerkungen	498
A.4.2.5	Anhang	498
A.4.3	Zum Umfang der Arbeit	498
A.4.4	Zum Schreibstil der Arbeit	498
Index		501