

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 Schmelzmassefließrate MFR | 92 |
| 3.1.6.2 | Das Hochdruck-Kapillarrheometer | 93 |
| 3.1.6.3 | Rotationsrheometer | 95 |
| 3.1.6.4 | Dehnrrheometer | 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 p | 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 Alterungerscheinungen | 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 Prototypen für großflächige Produkte und für gehäuseartige Produkte | 449 |
| 5.4.3.3 Prototypen für behälterartige Produkte | 451 |
| 5.4.3.4 Prototypen für komplexe Produkte | 452 |
| 5.5 Literaturverzeichnis | 453 |
| 6 Kunststoffe und Umwelt | 455 |
| 6.1 Kunststoffabfälle | 455 |
| 6.2 Sind Kunststoffe giftig? | 460 |
| 6.3 Biopolymere und Biokunststoffe | 465 |
| 6.3.1 Bioabbaubare Kunststoffe | 466 |
| 6.3.2 Biobasierte Kunststoffe | 471 |
| 6.3.3 Von Biopolymer zu Biokunststoff – Aufbereitung von Biopolymeren | 476 |

| | |
|--|------------|
| 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 |
|--------------|------------|