

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                            |          |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen</b>                           | <b>1</b> |
| 1.1      | Die Einzelkette                                                            | 2        |
| 1.1.1    | Der chemische Aufbau der Kette                                             | 2        |
| 1.1.2    | Der räumliche Aufbau der Kette                                             | 9        |
| 1.1.3    | Statistik der Einzelkette                                                  | 11       |
| 1.1.4    | Molekulargewichtsverteilung                                                | 12       |
| 1.1.5    | Bindungskräfte/Bindungstypen                                               | 14       |
| 1.2      | Klassifikation                                                             | 16       |
| 1.2.1    | Thermoplaste                                                               | 17       |
| 1.2.2    | Elastomere                                                                 | 17       |
| 1.2.3    | Duromere                                                                   | 17       |
| 1.2.4    | Thermoplastische Elastomere (Elastoplaste)                                 | 17       |
| 1.2.5    | Vergleich der Kunststoffklassen                                            | 18       |
| 1.3      | Der amorphe Zustand                                                        | 18       |
| 1.3.1    | Charakterisierung der mechanischen Zustände<br>(Glas-Gummi-viskoelastisch) | 21       |
| 1.3.2    | Glasverhalten                                                              | 23       |
| 1.3.3    | Gummiverhalten                                                             | 25       |
| 1.3.4    | Viskoses Verhalten                                                         | 29       |
| 1.4      | Flüssigkristalline Polymere                                                | 36       |
| 1.5      | Der kristalline Zustand                                                    | 39       |
| 1.5.1    | Grundlagen                                                                 | 39       |
| 1.5.2    | Kristallisation der relaxierten Schmelze                                   | 43       |
| 1.5.3    | Kristallisation gedehnter Schmelzen                                        | 47       |
| 1.5.4    | Kristallisation im longitudinalen Fließgradienten                          | 50       |
| 1.5.5    | Mechanisches Verhalten teilkristalliner polymerer Werkstoffe               | 53       |
| 1.5.6    | Thermisches Verhalten                                                      | 55       |
| 1.6      | Struktur und Eigenschaften                                                 | 62       |
| 1.6.1    | Elastizität/Plastizität teilkristalliner Kunststoffe                       | 62       |
| 1.6.2    | Elastizität/Plastizität amorpher Kunststoffe                               | 67       |
| 1.6.3    | Dynamische Belastungen                                                     | 71       |
| 1.6.4    | Thermische Charakterisierung                                               | 72       |

---

|          |                                                                                       |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.7      | Elektrische Eigenschaften .....                                                       | 76         |
| 1.7.1    | Dielektrische Eigenschaften .....                                                     | 77         |
| 1.7.2    | Piezo-, Pyro- und Ferroelektrizität .....                                             | 81         |
| 1.7.3    | Elektrische Leitfähigkeit .....                                                       | 83         |
|          | Literatur .....                                                                       | 85         |
| <b>2</b> | <b>Polymere Verbundwerkstoffe .....</b>                                               | <b>87</b>  |
| 2.1      | Motivation .....                                                                      | 88         |
| 2.2      | Verstärkungsadditive .....                                                            | 88         |
| 2.2.1    | Fasern .....                                                                          | 89         |
| 2.2.2    | Plattenförmige Verstärker .....                                                       | 93         |
| 2.3      | Polymere Matrix .....                                                                 | 93         |
| 2.4      | Grenzfläche Verstärkungsadditiv/Matrix .....                                          | 93         |
| 2.5      | Vor- und Nachteile von Faserverbundwerkstoffen .....                                  | 94         |
| 2.5.1    | Vorteile von Faserverbundwerkstoffen und mögliche Anwendungen .....                   | 94         |
| 2.5.2    | Nachteile von Faserverbundwerkstoffen .....                                           | 96         |
| 2.6      | Gefüge der Faserverbundwerkstoffe .....                                               | 96         |
| 2.6.1    | Vliese .....                                                                          | 97         |
| 2.6.2    | Gewebe .....                                                                          | 97         |
| 2.6.3    | Gelege .....                                                                          | 97         |
| 2.6.4    | Geflechte .....                                                                       | 98         |
| 2.6.5    | Gestricke und Gewirke .....                                                           | 98         |
| 2.7      | Mechanische Eigenschaften von Faserverbunden .....                                    | 99         |
| 2.7.1    | Der Elastizitätsmodul unidirektionaler Faserverbunde .....                            | 99         |
| 2.7.2    | Die Poissonzahl unidirektionaler Faserverbunde .....                                  | 102        |
| 2.7.3    | Der Schubmodul unidirektionaler Faserverbunde .....                                   | 102        |
| 2.7.4    | Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient<br>unidirektionaler Faserverbunde ..... | 102        |
| 2.7.5    | Die Bruchspannung unidirektionaler Faserverbunde .....                                | 103        |
| 2.7.6    | Mechanische Eigenschaften unter einem beliebigen<br>Belastungswinkel .....            | 104        |
| 2.7.7    | Druckfestigkeit in Faserrichtung .....                                                | 105        |
| 2.8      | Diskontinuierliche Faserverstärkung .....                                             | 106        |
| 2.9      | Lamine .....                                                                          | 108        |
| 2.10     | Schädigungen .....                                                                    | 109        |
|          | Literatur .....                                                                       | 110        |
| <b>3</b> | <b>Additive .....</b>                                                                 | <b>113</b> |
| 3.1      | Antioxidantien .....                                                                  | 117        |
| 3.1.1    | H-Donatoren .....                                                                     | 118        |
| 3.1.2    | Hydroperoxidzersetzer .....                                                           | 118        |
| 3.1.3    | Radikalfänger .....                                                                   | 119        |
| 3.1.4    | Austestung von Antioxidantien .....                                                   | 119        |

|       |                                                 |     |
|-------|-------------------------------------------------|-----|
| 3.2   | UV-Stabilisatoren .....                         | 121 |
| 3.2.1 | UV-Absorber .....                               | 123 |
| 3.2.2 | Sterisch gehinderte Amine .....                 | 124 |
| 3.2.3 | UV-Quencher .....                               | 125 |
| 3.2.4 | Austestung von UV-Stabilisatoren .....          | 125 |
| 3.3   | PVC-Stabilisatoren .....                        | 127 |
| 3.3.1 | Blei-Stabilisatoren .....                       | 130 |
| 3.3.2 | Organozinn-Stabilisatoren .....                 | 130 |
| 3.3.3 | Mischmetall-Stabilisatoren .....                | 131 |
| 3.3.4 | Aktuelle Entwicklungen .....                    | 133 |
| 3.3.5 | Austestung von PVC-Stabilisatoren .....         | 134 |
| 3.4   | Gleitmittel .....                               | 135 |
| 3.4.1 | Innere Gleitmittel .....                        | 136 |
| 3.4.2 | Äußere Gleitmittel .....                        | 137 |
| 3.4.3 | Austestung von Gleitmitteln .....               | 137 |
| 3.5   | Prozesshilfsmittel .....                        | 139 |
| 3.5.1 | Vermeidung von Schmelzebruch .....              | 140 |
| 3.5.2 | Vermeidung von Materialaufbau an der Düse ..... | 141 |
| 3.5.3 | Vermeidung von Gelbildung .....                 | 142 |
| 3.5.4 | Beschleunigter Farbwechsel .....                | 142 |
| 3.5.5 | Austestung von Prozesshilfsmitteln .....        | 142 |
| 3.6   | Antistatika .....                               | 143 |
| 3.6.1 | Nicht leitfähige Antistatika .....              | 143 |
| 3.6.2 | Leitfähige Antistatika .....                    | 145 |
| 3.6.3 | Austestung von Antistatika .....                | 145 |
| 3.7   | Biozide .....                                   | 145 |
| 3.7.1 | Mikroorganismen .....                           | 146 |
| 3.7.2 | Biozide Wirkstoffe .....                        | 148 |
| 3.7.3 | Austestung von Bioziden .....                   | 149 |
| 3.8   | Flammschutzmittel .....                         | 151 |
| 3.8.1 | Halogenhaltige Flammschutzmittel .....          | 152 |
| 3.8.2 | Metallhydroxide .....                           | 153 |
| 3.8.3 | Phosphorhaltige Flammschutzmittel .....         | 154 |
| 3.8.4 | Intumeszenz-Flammschutzmittelsysteme .....      | 154 |
| 3.8.5 | Brandprüfungen .....                            | 155 |
| 3.9   | Weichmacher .....                               | 157 |
| 3.9.1 | Primärweichmacher .....                         | 158 |
| 3.9.2 | Sekundärweichmacher .....                       | 159 |
| 3.9.3 | Extender .....                                  | 159 |
| 3.9.4 | Auswahlkriterien für Weichmacher .....          | 159 |
| 3.9.5 | Austestung von Weichmachern .....               | 162 |
|       | Literatur .....                                 | 163 |

|          |                                                           |     |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----|
| <b>4</b> | <b>Verarbeitungsmethoden</b>                              | 165 |
| 4.1      | Pressformen                                               | 166 |
| 4.2      | Spritzgießen                                              | 170 |
| 4.2.1    | Formmassen                                                | 170 |
| 4.2.2    | Spritzgießmaschinen                                       | 170 |
| 4.2.3    | Spritzgießwerkzeuge                                       | 174 |
| 4.2.4    | Spezielle Spritzgießverfahren                             | 178 |
| 4.2.5    | Fehlerbehebung                                            | 181 |
| 4.2.6    | Anwendungsbereiche                                        | 183 |
| 4.3      | Extrudieren                                               | 184 |
| 4.3.1    | Einschneckenextruder                                      | 186 |
| 4.3.2    | Doppelschneckenextruder                                   | 186 |
| 4.3.3    | Ko-Kneter                                                 | 189 |
| 4.3.4    | Anwendungen                                               | 189 |
| 4.4      | Kalandrieren                                              | 198 |
| 4.5      | Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe                 | 200 |
| 4.5.1    | Begriffe in der Verarbeitung faserverstärkter Kunststoffe | 200 |
| 4.5.2    | Handlaminierung                                           | 201 |
| 4.5.3    | Faserspritzen                                             | 202 |
| 4.5.4    | Schleuderverfahren                                        | 202 |
| 4.5.5    | Wickelverfahren                                           | 202 |
| 4.5.6    | Autoklavenverfahren                                       | 204 |
| 4.5.7    | Pressen                                                   | 204 |
| 4.5.8    | Pultrusion                                                | 204 |
| 4.5.9    | Harzinjektionsverfahren                                   | 204 |
| 4.6      | Vakuum-Tiefziehen                                         | 205 |
| 4.7      | Biegeumformen                                             | 206 |
| 4.8      | Schweißen                                                 | 206 |
| 4.8.1    | Heizelementschweißen                                      | 207 |
| 4.8.2    | Warmgasschweißen                                          | 214 |
| 4.8.3    | Lichtstrahl-Extrusionsschweißen                           | 216 |
| 4.8.4    | Ultraschallschweißen                                      | 217 |
| 4.8.5    | Reibschweißen                                             | 217 |
| 4.8.6    | Hochfrequenzschweißen                                     | 218 |
| 4.9      | Kleben                                                    | 218 |
| 4.9.1    | Einteilung der Klebstoffe                                 | 218 |
| 4.9.2    | Kleben von Kunststoffen                                   | 220 |
|          | Literatur                                                 | 221 |

|          |                                                                           |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>5</b> | <b>Werkstoffauswahl – Kunststoffe</b>                                     | 223 |
| 5.1      | Werkstoffdatenbanken für Kunststoffe                                      | 228 |
| 5.1.1    | CAMPUS®-Datenbank                                                         | 228 |
| 5.1.2    | KERN RIWETA Material Selector                                             | 229 |
| 5.2      | Beständigkeiten                                                           | 229 |
| 5.2.1    | Medienbeständigkeit                                                       | 230 |
| 5.2.2    | Wärmebeständigkeit                                                        | 234 |
| 5.2.3    | UV-Beständigkeit                                                          | 235 |
| 5.3      | Möglichkeiten zur Vorauswahl                                              | 235 |
|          | Literatur                                                                 | 237 |
| <b>6</b> | <b>Fallbeispiele</b>                                                      | 239 |
| 6.1      | Fahrzeugtechnik                                                           | 240 |
| 6.1.1    | Radkappen am Fahrwerk der Boeing 777                                      | 240 |
| 6.1.2    | Hochbelastete Drehmomentstütze für den Automobilbau                       | 243 |
| 6.1.3    | Drucksensoren für Kraftstofftanks                                         | 245 |
| 6.1.4    | Lenkgestänge des Weltrekordfahrzeugs HYSUN3000                            | 248 |
| 6.1.5    | Kunststoff-Montageträger                                                  | 250 |
| 6.2      | Landmaschinentechnik                                                      | 252 |
| 6.2.1    | Rohrverbindungen für Melkanlagen                                          | 252 |
| 6.3      | Konstruktionstechnik                                                      | 253 |
| 6.3.1    | Rillenkugellager                                                          | 253 |
| 6.4      | Produktionstechnik                                                        | 256 |
| 6.4.1    | Kreuzgelenk für eine Parallelkinematik                                    | 256 |
| 6.5      | Verfahrenstechnik                                                         | 259 |
| 6.5.1    | Produkte für explosionsgefährdete Bereiche                                | 259 |
| 6.5.2    | Axiallager für Saugpumpen von Nasswickelheizgeräten                       | 262 |
| 6.6      | Versorgungstechnik                                                        | 264 |
| 6.6.1    | Schutz von Trinkwasser                                                    | 264 |
| 6.6.2    | Ortung und Nachweis der Nichtbeschädigung<br>eines verlegten Rohrstranges | 267 |
| 6.7      | Rettungswesen                                                             | 270 |
| 6.7.1    | Küstenschutz                                                              | 270 |
| 6.7.2    | Löschwasserpumpen für Offshore-Plattformen                                | 272 |
| 6.7.3    | Visier für Feuerwehrhelme                                                 | 273 |
| 6.8      | Erneuerbare Energien                                                      | 276 |
| 6.8.1    | Mikrowindturbinen                                                         | 276 |
|          | Literatur                                                                 | 277 |
|          | <b>Stichwortverzeichnis</b>                                               | 279 |