

# Inhalt

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Vorwort zur vierten Auflage .....</b>                                                            | <b>V</b>   |
| <b>Prof. Dr. Phil. II Wolfgang Kaiser .....</b>                                                     | <b>VII</b> |
| <b>Hinweise zur Benutzung des Buches .....</b>                                                      | <b>IX</b>  |
| <b>1 Einführung .....</b>                                                                           | <b>1</b>   |
| 1.1 Werkstoffklassen .....                                                                          | 1          |
| 1.2 Bedeutung der Kunststoffe .....                                                                 | 3          |
| 1.2.1 Wachstumsursachen .....                                                                       | 4          |
| 1.2.1.1 Die Petrochemie als Rohstofflieferant .....                                                 | 4          |
| 1.2.1.2 Leichtgewicht Kunststoff .....                                                              | 4          |
| 1.2.1.3 Energiegünstiges Verhalten .....                                                            | 4          |
| 1.2.1.4 Komplexe Formteilgeometrien und hoher<br>Automatisierungsgrad .....                         | 5          |
| 1.2.1.5 Nutzung von Synergien .....                                                                 | 5          |
| 1.2.2 Kunststoffe und die Grundbedürfnisse des Menschen .....                                       | 6          |
| 1.2.2.1 Nahrung .....                                                                               | 6          |
| 1.2.2.2 Gesundheit .....                                                                            | 7          |
| 1.2.2.3 Kleidung .....                                                                              | 7          |
| 1.2.2.4 Wohnung .....                                                                               | 8          |
| 1.2.2.5 Kommunikation .....                                                                         | 8          |
| 1.3 Geschichte der Kunststoffe .....                                                                | 8          |
| 1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Polymerwissenschaften<br>(ohne Copolymere und Blends) ..... | 12         |
| 1.4 Zukunft der Kunststoffe – Prognosen .....                                                       | 23         |
| 1.4.1 Zukünftiger Pro Kopf-Verbrauch von Kunststoff-Werkstoffen .                                   | 24         |
| 1.4.2 Erwartungen an Polymere .....                                                                 | 25         |
| 1.4.3 Zukünftige Rohstoffquellen .....                                                              | 25         |
| 1.5 Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen .....                                             | 28         |
| 1.5.1 Einteilung der Kunststoffe nach Bedarf<br>und Anwendungsgebieten .....                        | 28         |
| 1.5.2 Einteilung der Kunststoffe<br>nach ihrem Eigenschaftsprofil .....                             | 28         |
| <b>2 Grundlagen .....</b>                                                                           | <b>33</b>  |
| 2.1 Was sind Kunststoffe .....                                                                      | 34         |

|         |                                                                                        |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.1   | Einteilung der Kunststoffe .....                                                       | 37 |
| 2.1.2   | Makromolekül-Architektur/Topologie .....                                               | 38 |
| 2.2     | Bildungsreaktionen für Makromoleküle – Polyreaktionen .....                            | 41 |
| 2.2.1   | Kettenpolymerisation .....                                                             | 42 |
| 2.2.1.1 | Radikalische Kettenpolymerisation .....                                                | 43 |
| 2.2.1.2 | Kationische Kettenpolymerisation .....                                                 | 46 |
| 2.2.1.3 | Anionische Kettenpolymerisation .....                                                  | 48 |
| 2.2.1.4 | Koordinative Kettenpolymerisation/Polyinsertion ..                                     | 50 |
| 2.2.1.5 | Homo- und Copolymerisate .....                                                         | 51 |
| 2.2.1.6 | Chemische Vernetzung durch<br>Kettencopolymerisation .....                             | 53 |
| 2.2.1.7 | Verfahrenstechnik der Kettenpolymerisation .....                                       | 53 |
| 2.2.1.8 | Plasmapolymerisation .....                                                             | 58 |
| 2.2.2   | Kondensationspolymerisation (Polykondensation) .....                                   | 58 |
| 2.2.3   | Additionspolymerisation (Polyaddition) .....                                           | 62 |
| 2.2.4   | Verfahrenstechnik der Kondensationspolymerisation<br>und Additionspolymerisation ..... | 63 |
| 2.2.5   | Einteilung nach dem Typ der Aufbaureaktionen .....                                     | 64 |
| 2.2.6   | Chemische Umsetzungen an Makromolekülen .....                                          | 65 |
| 2.2.6.1 | Vergrößerung des Polymerisationsgrads .....                                            | 65 |
| 2.2.6.2 | Beibehaltung des Polymerisationsgrads .....                                            | 65 |
| 2.2.6.3 | Verringerung des Polymerisationsgrads .....                                            | 66 |
| 2.2.6.4 | Chemische Umsetzungen an makromolekularen<br>Naturstoffen .....                        | 66 |
| 2.3     | Bindungskräfte in makromolekularen Systemen .....                                      | 67 |
| 2.3.1   | Hauptvalenzbindungen .....                                                             | 67 |
| 2.3.2   | Nebenvalenzbindungen .....                                                             | 70 |
| 2.3.3   | Ionenbindungen .....                                                                   | 74 |
| 2.3.4   | Mechanische Bindungen .....                                                            | 74 |
| 2.4     | Strukturmerkmale von Kunststoffen .....                                                | 75 |
| 2.4.1   | Chemische Struktur .....                                                               | 76 |
| 2.4.1.1 | Konstitution .....                                                                     | 76 |
| 2.4.1.2 | Konfiguration .....                                                                    | 82 |
| 2.4.2   | Festkörperstruktur .....                                                               | 84 |
| 2.4.2.1 | Räumliche Anordnung eines Makromoleküls .....                                          | 84 |
| 2.4.2.2 | Räumliche Anordnung mehrerer Makromoleküle<br>zu einem Verband .....                   | 85 |
| 2.4.2.3 | Kristallinität .....                                                                   | 88 |
| 2.4.3   | Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung .....                              | 90 |
| 2.4.3.1 | Kettenlänge .....                                                                      | 90 |
| 2.4.3.2 | Molmasse $M$ bei niedermolekularen Verbindungen .....                                  | 91 |

|         |                                                                                              |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.3.3 | Mittlere Molmasse $\bar{M}$ und Molmassenverteilung bei hochmolekularen Verbindungen .....   | 91  |
| 2.4.3.4 | Mittlerer Polymerisationsgrad .....                                                          | 93  |
| 2.4.3.5 | Beeinflussung von Eigenschaften durch die mittlere Molmasse .....                            | 94  |
| 2.5     | Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen .....                                           | 95  |
| 2.5.1   | Chemisches Modifizieren von Polymeren .....                                                  | 95  |
| 2.5.1.1 | Steuerung von Synthesereaktionen .....                                                       | 95  |
| 2.5.1.2 | Copolymerisation .....                                                                       | 96  |
| 2.5.1.3 | Andere chemische Modifikationen .....                                                        | 96  |
| 2.5.2   | Physikalische Modifizierung von Polymeren und Kunststoffen .....                             | 96  |
| 2.5.2.1 | Polymergemische und Polymerblends .....                                                      | 96  |
| 2.5.2.2 | Erhöhung der Ordnung in Polymeren .....                                                      | 97  |
| 2.5.3   | Modifizieren mit Zusatzstoffen (Additive) .....                                              | 99  |
| 2.5.3.1 | Füllstoffe .....                                                                             | 100 |
| 2.5.3.2 | Verstärkungsstoffe .....                                                                     | 101 |
| 2.5.3.3 | Weichmacher .....                                                                            | 102 |
| 2.5.3.4 | Treibmittel .....                                                                            | 102 |
| 2.5.3.5 | Farbmittel .....                                                                             | 102 |
| 2.5.3.6 | Stabilisatoren .....                                                                         | 103 |
| 2.5.3.7 | Flammhemmende Zusätze .....                                                                  | 104 |
| 2.5.3.8 | Weitere Additivgruppen .....                                                                 | 104 |
| 2.6     | Wichtige Eigenschaften der Kunststoffe .....                                                 | 106 |
| 2.6.1   | Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoff-Schmelzen .....                                    | 106 |
| 2.6.1.1 | Viskositätsfunktionen von Thermoplastschmelzen ..                                            | 108 |
| 2.6.1.2 | Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen ... | 110 |
| 2.6.2   | Thermisch-mechanisches Verhalten .....                                                       | 112 |
| 2.6.2.1 | Thermoplaste .....                                                                           | 112 |
| 2.6.2.2 | Elastomere und Duroplaste .....                                                              | 115 |
| 2.6.3   | Chrono-mechanisches Verhalten .....                                                          | 117 |
| 2.6.4   | Verhalten gegen Umwelteinflüsse .....                                                        | 120 |
| 2.6.4.1 | Chemische Beständigkeit .....                                                                | 120 |
| 2.7     | Alterung und Alterungsschutz .....                                                           | 123 |
| 2.7.1   | Alterung und Alterungsvorgänge .....                                                         | 123 |
| 2.7.1.1 | Chemische Alterungsvorgänge .....                                                            | 123 |
| 2.7.1.2 | Physikalische Alterungsvorgänge .....                                                        | 126 |
| 2.7.2   | Alterungsschutz .....                                                                        | 126 |
| 2.8     | Chemische Reaktionen bei der Kunststoffverarbeitung .....                                    | 130 |
| 2.8.1   | Chemische Reaktionen im Aufgabenbereich des Verarbeiters                                     | 131 |

|          |                                                                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.8.1.1  | Gezielte chemische Reaktionen während der Verarbeitung .....                                                              | 131        |
| 2.8.1.2  | Unerwünschte chemische Reaktionen während der Verarbeitung als Begleiterscheinung .....                                   | 131        |
| 2.8.1.3  | Chemische Reaktionen außerhalb der Verarbeitung, jedoch vom Verarbeiter durch Zugabe von Hilfsmitteln beeinflussbar ..... | 131        |
| 2.8.2    | Kunststofferzeugung beim Verarbeiter .....                                                                                | 132        |
| 2.9      | Wichtige Aspekt bei der Schadenverhütung und Schadensanalyse im Kunststoffbereich .....                                   | 133        |
| 2.9.1    | Thermoanalyse (TA) zur Schadenverhütung/Schadensanalyse .....                                                             | 134        |
| 2.9.1.1  | Differential-Kalorimetrie (Differential Scanning-Calorimetry), DSC .....                                                  | 135        |
| 2.9.2    | Mikroskopische Gefügeanalyse an Bauteilen und Halbzeug .....                                                              | 138        |
| <b>3</b> | <b>Technologie der Verarbeitung von Kunststoffen .....</b>                                                                | <b>141</b> |
| 3.1      | Allgemeines .....                                                                                                         | 141        |
| 3.2      | Begriffe und Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8850 ....                                                        | 142        |
| 3.3      | Prinzip der wichtigsten Ver- und Bearbeitungsverfahren .....                                                              | 143        |
| 3.4      | Aufbereitung .....                                                                                                        | 144        |
| 3.4.1    | Einteilung der Aufbereitungsverfahren .....                                                                               | 145        |
| 3.4.1.1  | Mischen .....                                                                                                             | 146        |
| 3.4.1.2  | Granulieren .....                                                                                                         | 148        |
| 3.4.1.3  | Zerkleinern .....                                                                                                         | 149        |
| 3.4.1.4  | Vortrocknen .....                                                                                                         | 150        |
| 3.5      | Urformen .....                                                                                                            | 151        |
| 3.5.1    | Extrudieren (Strangpressen) .....                                                                                         | 152        |
| 3.5.1.1  | Aufbau eines Extruders .....                                                                                              | 153        |
| 3.5.1.2  | Beispiele typischer Extrusionsanlagen .....                                                                               | 158        |
| 3.5.2    | Blasformen .....                                                                                                          | 162        |
| 3.5.2.1  | Extrusionsblasformen .....                                                                                                | 162        |
| 3.5.2.2  | Extrusions-Streckblasformen .....                                                                                         | 165        |
| 3.5.2.3  | Spritzblasformen .....                                                                                                    | 166        |
| 3.5.2.4  | Spritz-Streckblasformen .....                                                                                             | 166        |
| 3.5.3    | Spritzgießen .....                                                                                                        | 167        |
| 3.5.3.1  | Verfahrenstechnik beim Spritzgießen .....                                                                                 | 167        |
| 3.5.3.2  | Spritzgießmaschine .....                                                                                                  | 168        |
| 3.5.3.3  | Einflussgrößen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen .....                                                           | 171        |
| 3.5.3.4  | Sonderverfahren der Spritzgießtechnik .....                                                                               | 172        |
| 3.5.3.5  | Spritzgießen von vernetzenden Polymeren .....                                                                             | 177        |

|          |                                                                |     |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.4    | Pressen, Spritzpressen, Schichtpressen .....                   | 177 |
| 3.5.4.1  | Pressen von Duroplasten .....                                  | 178 |
| 3.5.4.2  | Pressen von Thermoplasten .....                                | 179 |
| 3.5.4.3  | Spritzpressen von Duroplasten .....                            | 179 |
| 3.5.4.4  | Schichtpressen von Duroplasten .....                           | 180 |
| 3.5.5    | Kalandrieren .....                                             | 180 |
| 3.5.5.1  | Bauarten des Kalanders .....                                   | 180 |
| 3.5.5.2  | Verfahrenstechnik beim Kalandrieren .....                      | 181 |
| 3.5.6    | Spinnverfahren .....                                           | 182 |
| 3.5.6.1  | Grundlagen des Spinnprozesses .....                            | 183 |
| 3.5.6.2  | Herstellung von Chemiefasern .....                             | 184 |
| 3.5.6.3  | Textile Definitionen .....                                     | 189 |
| 3.5.6.4  | Textile Flächegebilde .....                                    | 190 |
| 3.5.7    | FVK-Urformen .....                                             | 191 |
| 3.5.7.1  | Prepregverarbeitung .....                                      | 192 |
| 3.5.7.2  | Faserspritzen .....                                            | 192 |
| 3.5.7.3  | Faserwickeln .....                                             | 193 |
| 3.5.7.4  | Pultrusion .....                                               | 193 |
| 3.5.7.5  | RTM-Verfahren .....                                            | 193 |
| 3.5.7.6  | Handlaminieren .....                                           | 195 |
| 3.5.8    | Schäumen .....                                                 | 196 |
| 3.5.8.1  | Herstellung eines Schaumstoffes .....                          | 197 |
| 3.5.8.2  | Einteilung der Schäumverfahren .....                           | 198 |
| 3.5.8.3  | Polystyrol-Schaumstoffe .....                                  | 199 |
| 3.5.8.4  | Polyurethan-Schaumstoffe .....                                 | 201 |
| 3.5.9    | Gießen .....                                                   | 207 |
| 3.5.9.1  | Vakuumgießen .....                                             | 208 |
| 3.5.9.2  | Rotationsformen (Rotationsgießen) .....                        | 210 |
| 3.5.9.3  | Schleuderverfahren (Schleudergießen) .....                     | 211 |
| 3.5.9.4  | Filmgießen (Foliengießen) .....                                | 211 |
| 3.5.9.5  | Einbetten, Imprägnieren, Tränken .....                         | 212 |
| 3.5.10   | Tauchformen .....                                              | 212 |
| 3.5.11   | Additive Fertigungsverfahren (Additive Manufacturing AM) ..... | 213 |
| 3.5.11.1 | Polymerisation als Basis für AM .....                          | 214 |
| 3.5.11.2 | Selektives Lasersintern (SLS) .....                            | 216 |
| 3.5.11.3 | Fused Layer Modeling (FLM) .....                               | 216 |
| 3.5.11.4 | Layer Laminate Manufacturing<br>(LLM, auch LOM®) .....         | 216 |
| 3.5.11.5 | Aerosolprinting und Bioplotter .....                           | 216 |

|         |                                                                                               |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6     | Umformen .....                                                                                | 217 |
| 3.6.1   | Unterschiede im Warmformbereich zwischen<br>amorphen und teilkristallinen Thermoplasten ..... | 217 |
| 3.6.2   | Einteilung der Warmformverfahren für Thermoplaste .....                                       | 218 |
| 3.6.2.1 | Biegeumformen .....                                                                           | 218 |
| 3.6.2.2 | Zugumformen .....                                                                             | 218 |
| 3.6.2.3 | Druckumformen .....                                                                           | 220 |
| 3.6.2.4 | Zugdruckumformen .....                                                                        | 220 |
| 3.6.2.5 | Kombinierte Verfahren .....                                                                   | 221 |
| 3.6.3   | Verfahrenstechnik beim Warmformen .....                                                       | 221 |
| 3.6.4   | Thermoformmaschinen .....                                                                     | 223 |
| 3.6.5   | Vor- und Nachteile des Warmformens .....                                                      | 225 |
| 3.7     | Trennen (Spanen) .....                                                                        | 225 |
| 3.8     | Fügen .....                                                                                   | 227 |
| 3.8.1   | Schweißen .....                                                                               | 227 |
| 3.8.1.1 | Heizelementschweißen .....                                                                    | 229 |
| 3.8.1.2 | Wargassschweißen .....                                                                        | 230 |
| 3.8.1.3 | Strahlungsschweißen .....                                                                     | 230 |
| 3.8.1.4 | Reibungsschweißen .....                                                                       | 231 |
| 3.8.1.5 | Induktionsschweißen .....                                                                     | 232 |
| 3.8.2   | Kleben .....                                                                                  | 232 |
| 3.8.2.1 | Grundlagen .....                                                                              | 232 |
| 3.8.2.2 | Abbindemechanismus der Klebung .....                                                          | 233 |
| 3.8.2.3 | Verfahrenstechnik .....                                                                       | 235 |
| 3.8.3   | Mechanische Verbindungen .....                                                                | 235 |
| 3.9     | Beschichten .....                                                                             | 235 |
| 3.9.1   | Einteilung der Beschichtungsverfahren .....                                                   | 235 |
| 3.9.2   | Streichverfahren .....                                                                        | 236 |
| 3.9.3   | Pulverbeschichten .....                                                                       | 237 |
| 3.10    | Veredeln .....                                                                                | 238 |
| 3.10.1  | Lackieren von Kunststoffen .....                                                              | 239 |
| 3.10.2  | Bedrucken von Kunststoffen .....                                                              | 239 |
| 3.10.3  | Laserbeschriften .....                                                                        | 241 |
| 3.10.4  | Heißprägen .....                                                                              | 241 |
| 3.10.5  | Metallisieren .....                                                                           | 241 |
| 3.10.6  | Beflocken .....                                                                               | 243 |
| 3.10.7  | Plasmabeschichten .....                                                                       | 243 |
| 3.10.8  | Tempern .....                                                                                 | 244 |
| 3.10.9  | Konditionieren .....                                                                          | 245 |
| 3.10.10 | Bestrahlen .....                                                                              | 245 |

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4 Polyolefine</b>                                           | <b>249</b> |
| 4.1 Polyethylen (PE)                                           | 249        |
| 4.1.1 Das Wichtigste in Kürze                                  | 249        |
| 4.1.2 Handelsnamen (Beispiele®)                                | 249        |
| 4.1.3 Eigenschaften                                            | 250        |
| 4.1.4 Verarbeitung und Anwendung                               | 251        |
| 4.1.5 Anwendungsbeispiele                                      | 252        |
| 4.1.6 Der Weg zum Polyethylen                                  | 253        |
| 4.1.6.1 Hochdruckverfahren                                     | 253        |
| 4.1.6.2 Niederdruckverfahren                                   | 254        |
| 4.1.7 Der molekulare Aufbau des Polyethylens                   | 256        |
| 4.1.7.1 Polyethylene mit multimodaler Molmassen-<br>verteilung | 258        |
| 4.1.7.2 Ethylen-Copolymere mit $\alpha$ -Olefinen              | 259        |
| 4.1.7.3 Metallocen-katalysierte Ethylencopolymere<br>(PE-MC)   | 260        |
| 4.2 Chemische Modifikation von Polyethylen                     | 260        |
| 4.2.1 Abwandlung durch Vernetzen                               | 260        |
| 4.2.2 Abwandlung durch chemische Veränderungen                 | 262        |
| 4.2.3 Weitere Ethylen-Copolymere                               | 263        |
| 4.2.3.1 Unpolare Ethylen-Copolymere                            | 263        |
| 4.2.3.2 Polare Ethylen-Copolymere                              | 263        |
| 4.3 Polypropylen (PP)                                          | 269        |
| 4.3.1 Das Wichtigste in Kürze                                  | 269        |
| 4.3.2 Handelsnamen (Beispiele®)                                | 269        |
| 4.3.3 Eigenschaften                                            | 270        |
| 4.3.4 Verarbeitung und Anwendung                               | 271        |
| 4.3.5 Anwendungsbeispiele                                      | 271        |
| 4.3.6 Der Weg zum Polypropylen                                 | 272        |
| 4.3.7 Der molekulare Aufbau von Polypropylen                   | 273        |
| 4.3.7.1 Isotaktisches Polypropylen (iPP)                       | 274        |
| 4.3.7.2 Syndiotaktisches Polypropylen (sPP)                    | 274        |
| 4.3.7.3 Ataktisches Polypropylen (aPP)                         | 275        |
| 4.4 Modifikation von Polypropylen                              | 275        |
| 4.4.1 PP-Copolymere                                            | 275        |
| 4.4.2 Gefüllte und verstärkte Polypropylene                    | 276        |
| 4.4.3 Chemische Modifikation am fertigen PP-Polymer            | 277        |
| 4.5 Polyisobutylen (PIB)                                       | 277        |
| 4.5.1 Handelsnamen (Beispiele®)                                | 277        |
| 4.5.2 Eigenschaften                                            | 277        |

|          |                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.3    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                            | 278        |
| 4.5.4    | Anwendungsbeispiele .....                                                 | 278        |
| 4.5.5    | Der Weg zum Polyisobutylen .....                                          | 278        |
| 4.6      | Polybuten-1 (PB) .....                                                    | 279        |
| 4.6.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                           | 279        |
| 4.6.2    | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....                           | 279        |
| 4.6.3    | Der Weg zum Polybuten-1 .....                                             | 280        |
| 4.7      | Poly-4-methylpenten-1 (PMP) .....                                         | 280        |
| 4.7.1    | Handelsnamen (Beispiel®) .....                                            | 280        |
| 4.7.2    | Eigenschaften .....                                                       | 280        |
| 4.7.3    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                            | 281        |
| 4.7.4    | Anwendungsbeispiele .....                                                 | 281        |
| 4.7.5    | Der Weg zum Poly-4-methylpenten-1 .....                                   | 281        |
| 4.8      | Geschichtliches .....                                                     | 282        |
| 4.9      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                | 283        |
| <b>5</b> | <b>Chlor-Kunststoffe .....</b>                                            | <b>287</b> |
| 5.1      | Hart-Polyvinylchlorid (PVC-U) (Hart-PVC, weichmacherfreies PVC) .....     | 287        |
| 5.1.1    | Das Wichtigste in Kürze über Hart-Polyvinylchlorid .....                  | 287        |
| 5.1.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                           | 287        |
| 5.1.3    | Eigenschaften .....                                                       | 288        |
| 5.1.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                            | 289        |
| 5.1.5    | Anwendungsbeispiele .....                                                 | 290        |
| 5.1.6    | Der Weg zum Polyvinylchlorid .....                                        | 290        |
| 5.2      | Modifizierte Vinylchlorid-Polymerisate .....                              | 294        |
| 5.2.1    | Vinylchlorid-Copolymere .....                                             | 294        |
| 5.2.1.1  | Einteilung .....                                                          | 294        |
| 5.2.1.2  | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....                           | 296        |
| 5.2.1.3  | Der Weg zu den Vinylchlorid-Copolymeren .....                             | 296        |
| 5.2.2    | Besonders schlagfestes Polyvinylchlorid (PVC-HI) .....                    | 297        |
| 5.2.2.1  | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....                           | 297        |
| 5.2.2.2  | Der Weg zum besonders schlagfesten Polyvinylchlorid .....                 | 297        |
| 5.2.3    | Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C) .....                                | 298        |
| 5.2.3.1  | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....                           | 298        |
| 5.2.3.2  | Der Weg zum chlorierten Polyvinylchlorid .....                            | 299        |
| 5.3      | Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) (Weich-PVC, weichmacherhaltiges PVC) ..... | 299        |
| 5.3.1    | Das Wichtigste in Kürze über Weich-Polyvinylchlorid .....                 | 299        |
| 5.3.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                           | 300        |

|          |                                                                                         |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.3    | Eigenschaften .....                                                                     | 300        |
| 5.3.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                          | 301        |
| 5.3.5    | Anwendungsbeispiele .....                                                               | 301        |
| 5.3.6    | Der Weg zum Weich-Polyvinylchlorid .....                                                | 302        |
| 5.3.6.1  | Weichmacher .....                                                                       | 302        |
| 5.3.6.2  | Einarbeitung von Weichmachern .....                                                     | 304        |
| 5.4      | Chloriertes Polyethylen (PE-C) .....                                                    | 306        |
| 5.4.1    | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung .....                                         | 306        |
| 5.4.2    | Der Weg zum chlorierten Polyethylen .....                                               | 306        |
| 5.5      | Polyvinylidenchlorid (PVDC) .....                                                       | 307        |
| 5.5.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                                                           | 307        |
| 5.5.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                         | 308        |
| 5.5.3    | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von<br>Vinylidenchlorid-Copolymerisaten ..... | 308        |
| 5.5.4    | Der Weg zu den Vinylidenchlorid-Copolymerisaten .....                                   | 308        |
| 5.6      | Geschichtliches .....                                                                   | 309        |
| 5.7      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                              | 309        |
| <b>6</b> | <b>Polystyrol-Kunststoffe .....</b>                                                     | <b>313</b> |
| 6.1      | Das Wichtigste in Kürze über Polystyrol-Kunststoffe .....                               | 313        |
| 6.2      | Polystyrol (PS) .....                                                                   | 314        |
| 6.2.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                         | 314        |
| 6.2.2    | Ataktisches Polystyrol .....                                                            | 314        |
| 6.2.2.1  | Eigenschaften .....                                                                     | 314        |
| 6.2.2.2  | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                          | 315        |
| 6.2.2.3  | Anwendungsbeispiele .....                                                               | 315        |
| 6.2.2.4  | Der Weg zum Polystyrol .....                                                            | 315        |
| 6.2.3    | Stereoreguläre Polystyrole .....                                                        | 317        |
| 6.3      | Modifizierte Styrolpolymere (Abschnitt 6.4 bis 6.8) .....                               | 318        |
| 6.4      | Styrol-Acrylnitril-Copolymerisat (SAN) .....                                            | 319        |
| 6.4.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                         | 319        |
| 6.4.2    | Eigenschaften und Verarbeitung .....                                                    | 319        |
| 6.4.3    | Anwendungsbeispiele .....                                                               | 320        |
| 6.4.4    | Der Weg zum Styrol-Acrylnitril .....                                                    | 320        |
| 6.5      | Schlagzäh modifiziertes Polystyrol (PS-I) (Styrol-Butadien SB) .....                    | 321        |
| 6.5.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                         | 321        |
| 6.5.2    | Eigenschaften .....                                                                     | 321        |
| 6.5.3    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                          | 322        |
| 6.5.4    | Anwendungsbeispiele .....                                                               | 322        |
| 6.5.5    | Der Weg zum schlagzähem Polystyrol .....                                                | 322        |

|          |                                                                                                     |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.6      | Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS) .....                                                | 325        |
| 6.6.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                                     | 326        |
| 6.6.2    | Eigenschaften .....                                                                                 | 326        |
| 6.6.3    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                                      | 326        |
| 6.6.4    | Anwendungsbeispiele .....                                                                           | 326        |
| 6.6.5    | Der Weg zum Acrylnitril-Butadien-Styrol .....                                                       | 327        |
| 6.7      | Schlagzähe Acrylnitril-Styrol-Formmassen (ASA, AES, ACS) .....                                      | 329        |
| 6.7.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                                     | 329        |
| 6.7.2    | Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung von<br>Acrylnitril-Styrol-Acrylat (ASA) .....             | 329        |
| 6.7.3    | Der Weg zum Acrylnitril-Styrol-Acrylat .....                                                        | 330        |
| 6.8      | Blends .....                                                                                        | 331        |
| 6.8.1    | PS-I + PPE Blends .....                                                                             | 331        |
| 6.8.2    | ABS + PC bzw. ASA + PC Blends .....                                                                 | 331        |
| 6.8.3    | ABS + PA Blends .....                                                                               | 332        |
| 6.9      | Geschichtliches zu den Styrolpolymeren .....                                                        | 332        |
| 6.10     | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                                          | 333        |
| <b>7</b> | <b>Ester-Thermoplaste .....</b>                                                                     | <b>339</b> |
| 7.1      | Ester-Gruppe in der Hauptkette .....                                                                | 340        |
| 7.1.1    | Polyalkylenterephthalate („gesättigte“ Polyester) (PET, PBT)<br>und Polyethylnaphthalat (PEN) ..... | 340        |
| 7.1.1.1  | Das Wichtigste in Kürze über Polyalkylenterephthalate .....                                         | 340        |
| 7.1.1.2  | Der Weg zu den Polyalkylenterephthalaten .....                                                      | 340        |
| 7.1.1.3  | Polyethylenerephthalat (PET) .....                                                                  | 342        |
| 7.1.1.4  | Polybutylenterephthalat (PBT) .....                                                                 | 344        |
| 7.1.1.5  | Modifizierte Polyalkylenterephthalate .....                                                         | 345        |
| 7.1.1.6  | Polyethylnaphthalat (PEN) .....                                                                     | 346        |
| 7.1.1.7  | Geschichtliches .....                                                                               | 346        |
| 7.1.2    | Polycarbonat (PC) .....                                                                             | 347        |
| 7.1.2.1  | Das Wichtigste in Kürze über Polycarbonat .....                                                     | 347        |
| 7.1.2.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                                     | 347        |
| 7.1.2.3  | Eigenschaften .....                                                                                 | 348        |
| 7.1.2.4  | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                                      | 348        |
| 7.1.2.5  | Anwendungsbeispiele .....                                                                           | 348        |
| 7.1.2.6  | Der Weg zum Polycarbonat .....                                                                      | 349        |
| 7.1.2.7  | Modifizierte Polycarbonate .....                                                                    | 351        |
| 7.1.2.8  | Geschichtliches .....                                                                               | 353        |

|         |                                                                   |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.3   | Polyestercarbonat (PEC) .....                                     | 353 |
| 7.1.3.1 | Das Wichtigste in Kürze .....                                     | 353 |
| 7.1.3.2 | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                   | 353 |
| 7.1.3.3 | Eigenschaften .....                                               | 353 |
| 7.1.3.4 | Verarbeitung (Beispiele) .....                                    | 354 |
| 7.1.3.5 | Anwendungsbeispiele .....                                         | 354 |
| 7.1.3.6 | Der Weg zu Polyestercarbonat .....                                | 354 |
| 7.1.3.7 | Geschichtliches .....                                             | 355 |
| 7.2     | Ester in der Seitenkette .....                                    | 355 |
| 7.2.1   | Polymethylmethacrylat (PMMA) .....                                | 355 |
| 7.2.1.1 | Das Wichtigste in Kürze .....                                     | 355 |
| 7.2.1.2 | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                   | 355 |
| 7.2.1.3 | Eigenschaften .....                                               | 355 |
| 7.2.1.4 | Verarbeitung (Beispiele) .....                                    | 356 |
| 7.2.1.5 | Anwendungsbeispiele .....                                         | 356 |
| 7.2.1.6 | Der Weg zum Polymethylmethacrylat .....                           | 356 |
| 7.2.1.7 | Modifizierte Methylmethacrylat-Polymerisate .....                 | 357 |
| 7.2.1.8 | Geschichtliches .....                                             | 359 |
| 7.3     | Celluloseester (CA, CP, CAB) .....                                | 360 |
| 7.3.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                                     | 360 |
| 7.3.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                   | 360 |
| 7.3.3   | Eigenschaften .....                                               | 360 |
| 7.3.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                                    | 361 |
| 7.3.5   | Anwendungsbeispiele .....                                         | 361 |
| 7.3.6   | Der Weg zu den Celluloseestern .....                              | 361 |
| 7.3.6.1 | Der Ausgangsstoff Cellulose .....                                 | 361 |
| 7.3.6.2 | Chemische Umsetzungen an Cellulose .....                          | 362 |
| 7.3.7   | Geschichtliches .....                                             | 363 |
| 7.4     | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                        | 364 |
| 8       | Stickstoff-Thermoplaste .....                                     | 373 |
| 8.1     | Polyamide (PA) .....                                              | 373 |
| 8.1.1   | Teilkristalline aliphatische Polyamide .....                      | 373 |
| 8.1.1.1 | Das Wichtigste in Kürze .....                                     | 373 |
| 8.1.1.2 | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                   | 375 |
| 8.1.1.3 | Eigenschaften .....                                               | 376 |
| 8.1.1.4 | Verarbeitung (Beispiele) .....                                    | 377 |
| 8.1.1.5 | Anwendungsbeispiele .....                                         | 378 |
| 8.1.1.6 | Der Weg zu den teilkristallinen aliphatischen<br>Polyamiden ..... | 378 |
| 8.1.1.7 | Wasserstoffbrücken (H-Brücken) .....                              | 382 |

|         |                                                                     |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.2   | Modifizierte teilkristalline aliphatische Polyamide .....           | 383 |
| 8.1.2.1 | Chemische Modifizierung .....                                       | 383 |
| 8.1.2.2 | Physikalische Modifizierung .....                                   | 383 |
| 8.1.2.3 | Anwendungsbeispiele .....                                           | 384 |
| 8.1.3   | Cycloaliphatische Polyamide .....                                   | 384 |
| 8.1.3.1 | Das Wichtigste in Kürze .....                                       | 384 |
| 8.1.3.2 | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                     | 384 |
| 8.1.3.3 | Eigenschaften .....                                                 | 384 |
| 8.1.3.4 | Verarbeitung (Beispiele) .....                                      | 385 |
| 8.1.3.5 | Anwendungsbeispiele .....                                           | 385 |
| 8.1.3.6 | Der Weg zu den cycloaliphatischen Polyamiden ...                    | 385 |
| 8.1.4   | Teilaromatische Polyamide .....                                     | 386 |
| 8.1.4.1 | Das Wichtigste in Kürze .....                                       | 386 |
| 8.1.4.2 | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                     | 388 |
| 8.1.4.3 | Eigenschaftsprofil im Vergleich zu Standard-Polyamiden .....        | 388 |
| 8.1.4.4 | Verarbeitung (Beispiele) .....                                      | 388 |
| 8.1.4.5 | Anwendungsbeispiele .....                                           | 388 |
| 8.1.4.6 | Der Weg zu den teilaromatischen Polyamiden ....                     | 389 |
| 8.1.5   | Modifizierung von teilaromatischen Polyamiden .....                 | 390 |
| 8.1.6   | Geschichtliches .....                                               | 391 |
| 8.2     | Polyacrylnitril PAN .....                                           | 392 |
| 8.2.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                                       | 392 |
| 8.2.2   | Handelsnamen (Beispiel®) .....                                      | 392 |
| 8.2.3   | Eigenschaften von Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen .....       | 392 |
| 8.2.4   | Verarbeitung und Anwendung (Beispiele) .....                        | 393 |
| 8.2.5   | Der Weg zu Polyacrylnitril-Barriere-Kunststoffen .....              | 393 |
| 8.2.6   | PAC-/ PAN-Fasertransformation zu Kohlenstofffasern (C-Fasern) ..... | 394 |
| 8.2.7   | Geschichtliches .....                                               | 395 |
| 8.3     | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                          | 395 |
| 9       | Acetal- und Ether-Thermoplaste .....                                | 403 |
| 9.1     | Polyoxymethylen (Polyacetal) (POM) .....                            | 404 |
| 9.1.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                                       | 404 |
| 9.1.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                     | 404 |
| 9.1.3   | Eigenschaften .....                                                 | 404 |
| 9.1.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                                      | 405 |
| 9.1.5   | Anwendungsbeispiele .....                                           | 405 |

|          |                                                                                            |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.6    | Der Weg zum Polyoxymethylen .....                                                          | 406 |
| 9.1.6.1  | POM-Homopolymerisat (POM-H) .....                                                          | 406 |
| 9.1.6.2  | POM-Copolymerisate (POM-Cop.) .....                                                        | 407 |
| 9.1.6.3  | Eigenschaftsunterschiede zwischen POM-Homo-<br>und Copolymerisaten .....                   | 408 |
| 9.1.7    | Modifizierte Polyoxymethylen-Polymerisate .....                                            | 408 |
| 9.1.8    | Geschichtliches .....                                                                      | 409 |
| 9.2      | Polyphenylenether (PPE) .....                                                              | 409 |
| 9.2.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                                                              | 409 |
| 9.2.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                            | 410 |
| 9.2.3    | Eigenschaften .....                                                                        | 410 |
| 9.2.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                             | 410 |
| 9.2.5    | Anwendungsbeispiele .....                                                                  | 410 |
| 9.2.6    | Der Weg zum Polyphenylenether .....                                                        | 411 |
| 9.2.7    | Weitere modifizierte Polyphenylenether .....                                               | 412 |
| 9.2.8    | Geschichtliches .....                                                                      | 412 |
| 9.3      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                                 | 412 |
| 10       | <b>Fluor-Kunststoffe</b> .....                                                             | 415 |
| 10.1     | Polytetrafluorethylen (PTFE) .....                                                         | 415 |
| 10.1.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                                                              | 415 |
| 10.1.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                            | 415 |
| 10.1.3   | Eigenschaften .....                                                                        | 415 |
| 10.1.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                             | 416 |
| 10.1.5   | Anwendungsbeispiele .....                                                                  | 417 |
| 10.1.6   | Der Weg zum Polytetrafluorethylen .....                                                    | 417 |
| 10.2     | Thermoplastisch verarbeitbare Fluor-Kunststoffe .....                                      | 420 |
| 10.2.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                                                              | 420 |
| 10.2.2   | Fluorthermoplaste und Beispiele® von Handelsnamen .....                                    | 421 |
| 10.2.3   | Eigenschaften .....                                                                        | 421 |
| 10.2.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                             | 421 |
| 10.2.5   | Anwendungen .....                                                                          | 422 |
| 10.2.5.1 | Spezielle Anwendungsbeispiele .....                                                        | 422 |
| 10.2.6   | Der Weg zu den thermoplastisch verarbeitbaren Fluor-<br>Kunststoffen .....                 | 423 |
| 10.2.6.1 | Perfluorethylenpropylen FEP, auch Tetrafluor-<br>ethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer ..... | 423 |
| 10.2.6.2 | Perfluoroalkoxy-Copolymer (PFA) .....                                                      | 423 |
| 10.2.6.3 | Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE) .....                                           | 424 |
| 10.2.6.4 | Polyvinylidenfluorid (PVDF) .....                                                          | 424 |

|           |                                                                                       |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.2.6.5  | Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Vinylidenfluorid-Terpolymer TFEHFPVDF (THV) ..... | 424        |
| 10.2.6.6  | Polyvinylfluorid (PVF) .....                                                          | 425        |
| 10.2.6.7  | Polychlortrifluorethylen (PCTFE) .....                                                | 425        |
| 10.2.6.8  | Ethylen-Chlortrifluorethylen-Copolymer (ECTFE) .....                                  | 425        |
| 10.3      | Geschichtliches zu den Fluoropolymeren .....                                          | 425        |
| 10.4      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                            | 426        |
| <b>11</b> | <b>Duroplaste</b> .....                                                               | <b>429</b> |
| 11.1      | Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften .....                                  | 429        |
| 11.2      | Phenoplaste (Phenol-Formaldehyd-Kondensationsharze) (PF) .....                        | 431        |
| 11.2.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                                                         | 431        |
| 11.2.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                       | 432        |
| 11.2.3    | Eigenschaften von PF-Formstoffen .....                                                | 432        |
| 11.2.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                                        | 434        |
| 11.2.5    | Anwendungsbeispiele .....                                                             | 434        |
| 11.2.5.1  | Harzformstoffe, Harzformteile .....                                                   | 434        |
| 11.2.5.2  | Schichtpressstoffe .....                                                              | 434        |
| 11.2.5.3  | PF-Harze .....                                                                        | 434        |
| 11.2.6    | Der Weg zu den Phenolharzen .....                                                     | 435        |
| 11.2.7    | Geschichtliches .....                                                                 | 439        |
| 11.3      | Aminoplaste .....                                                                     | 439        |
| 11.3.1    | Harnstoffharze (Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsharze) (UF) .....                  | 439        |
| 11.3.1.1  | Das Wichtigste in Kürze .....                                                         | 439        |
| 11.3.1.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                       | 439        |
| 11.3.1.3  | Eigenschaften .....                                                                   | 440        |
| 11.3.1.4  | Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....                                             | 441        |
| 11.3.1.5  | Der Weg zum Harnstoffharz .....                                                       | 441        |
| 11.3.2    | Melaminharze (Melamin-Formaldehyd-Kondensationsharze) (MF) .....                      | 443        |
| 11.3.2.1  | Das Wichtigste in Kürze .....                                                         | 443        |
| 11.3.2.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                       | 443        |
| 11.3.2.3  | Eigenschaften .....                                                                   | 443        |
| 11.3.2.4  | Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....                                             | 443        |
| 11.3.2.5  | Eigenschaften und Anwendung von modifizierten Melaminharzen (Beispiele) .....         | 444        |
| 11.3.2.6  | Der Weg zum Melaminharz .....                                                         | 444        |
| 11.3.3    | Geschichtliches .....                                                                 | 446        |
| 11.4      | Reaktionsharz-Duroplaste .....                                                        | 446        |

|           |                                                   |            |
|-----------|---------------------------------------------------|------------|
| 11.4.1    | Ungesättigte Polyesterharze (UP) .....            | 446        |
| 11.4.1.1  | Das Wichtigste in Kürze .....                     | 446        |
| 11.4.1.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                   | 447        |
| 11.4.1.3  | Eigenschaften .....                               | 447        |
| 11.4.1.4  | Verarbeitung (Beispiele) .....                    | 449        |
| 11.4.1.5  | Anwendungsbeispiele .....                         | 450        |
| 11.4.1.6  | Der Weg zu den ungesättigten Polyesterharzen .... | 451        |
| 11.4.1.7  | Geschichtliches .....                             | 455        |
| 11.4.2    | Vinylesterharze (VE) .....                        | 455        |
| 11.4.2.1  | Eigenschaften .....                               | 455        |
| 11.4.2.2  | Verarbeitung, Anwendung (Beispiele) .....         | 455        |
| 11.4.2.3  | Der Weg zu den Vinylesterharzen .....             | 456        |
| 11.4.2.4  | Geschichtliches .....                             | 456        |
| 11.4.3    | Epoxidharze (EP) .....                            | 457        |
| 11.4.3.1  | Das Wichtigste in Kürze .....                     | 457        |
| 11.4.3.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                   | 457        |
| 11.4.3.3  | Eigenschaften .....                               | 457        |
| 11.4.3.4  | Verarbeitung (Beispiele) .....                    | 458        |
| 11.4.3.5  | Anwendungsbeispiele .....                         | 458        |
| 11.4.3.6  | Der Weg zu den Epoxidharzen .....                 | 459        |
| 11.4.3.7  | Geschichtliches .....                             | 464        |
| 11.5      | Sonstige Harze .....                              | 464        |
| 11.5.1    | Siliconharze .....                                | 464        |
| 11.5.2    | Polydiallylphthalatharze (PDAP, PDAIP) .....      | 465        |
| 11.5.3    | PUR-Gießharze .....                               | 466        |
| 11.5.3.1  | Elastomer-Gießharze .....                         | 466        |
| 11.5.3.2  | Harte PUR-Harze .....                             | 466        |
| 11.5.4    | Cyanatester-Harze .....                           | 467        |
| <b>12</b> | <b>Hochleistungspolymere .....</b>                | <b>469</b> |
| 12.1      | Polyaryletherketone (PAEK) .....                  | 470        |
| 12.1.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                     | 470        |
| 12.1.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                   | 470        |
| 12.1.3    | Eigenschaften .....                               | 470        |
| 12.1.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                    | 471        |
| 12.1.5    | Anwendungsbeispiele .....                         | 472        |
| 12.1.6    | Der Weg zu den Polyaryletherketonen .....         | 472        |
| 12.1.7    | Geschichtliches .....                             | 472        |
| 12.2      | Polyarylate (PAR) .....                           | 473        |
| 12.2.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                     | 473        |

|          |                                                    |     |
|----------|----------------------------------------------------|-----|
| 12.2.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                    | 473 |
| 12.2.3   | Eigenschaften .....                                | 473 |
| 12.2.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                     | 474 |
| 12.2.5   | Anwendungsbeispiele .....                          | 474 |
| 12.2.6   | Der Weg zu den Polyarylaten .....                  | 475 |
| 12.2.7   | Geschichtliches .....                              | 476 |
| 12.3     | Flüssigkristalline Polymere (LCP) .....            | 476 |
| 12.3.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                      | 476 |
| 12.3.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                    | 476 |
| 12.3.3   | Eigenschaften .....                                | 476 |
| 12.3.3.1 | Aufbau und Struktur der LCP .....                  | 476 |
| 12.3.3.2 | Eigenschaften von thermotropen LCP .....           | 478 |
| 12.3.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                     | 479 |
| 12.3.5   | Anwendungsbeispiele .....                          | 479 |
| 12.3.6   | Der Weg zu den flüssigkristallinen Polymeren ..... | 480 |
| 12.3.6.1 | Herstellung der lyotropen LCP .....                | 480 |
| 12.3.6.2 | Herstellung der thermotropen LCP .....             | 481 |
| 12.3.7   | Geschichtliches .....                              | 482 |
| 12.4     | Polyimide (PI) .....                               | 482 |
| 12.4.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                      | 482 |
| 12.4.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                    | 483 |
| 12.4.3   | Eigenschaften .....                                | 483 |
| 12.4.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                     | 485 |
| 12.4.5   | Anwendungsbeispiele .....                          | 485 |
| 12.4.6   | Der Weg zu den Polyimiden .....                    | 485 |
| 12.4.7   | Geschichtliches .....                              | 490 |
| 12.5     | Polyarylsulfone (PSU, PES, PPSU) .....             | 491 |
| 12.5.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                      | 491 |
| 12.5.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                    | 491 |
| 12.5.3   | Eigenschaften .....                                | 492 |
| 12.5.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                     | 492 |
| 12.5.5   | Anwendungsbeispiele .....                          | 492 |
| 12.5.6   | Der Weg zu den Polyarylsulfonen .....              | 493 |
| 12.5.7   | Geschichtliches .....                              | 494 |
| 12.6     | Polyphenylensulfid (PPS) .....                     | 495 |
| 12.6.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                      | 495 |
| 12.6.2   | Handelsnamen (Beispiele®) .....                    | 495 |
| 12.6.3   | Eigenschaften .....                                | 495 |
| 12.6.4   | Verarbeitung (Beispiele) .....                     | 496 |
| 12.6.5   | Anwendungsbeispiele .....                          | 496 |

|           |                                                                             |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.6.6    | Der Weg zu Polyphenylensulfid .....                                         | 496        |
| 12.6.7    | Geschichtliches .....                                                       | 496        |
| 12.7      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                  | 497        |
| <b>13</b> | <b>Elastomere .....</b>                                                     | <b>503</b> |
| 13.1      | Permanent vernetzte Elastomere/Gummi .....                                  | 504        |
| 13.1.1    | Das Wichtigste in Kürze über vernetzte Elastomere .....                     | 504        |
| 13.1.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                             | 506        |
| 13.1.3    | Eigenschaften .....                                                         | 506        |
| 13.1.4    | Verarbeitung (Beispiele) .....                                              | 508        |
| 13.1.5    | Anwendungsbeispiele .....                                                   | 508        |
| 13.1.6    | Der Weg zu den permanent vernetzten Elastomeren .....                       | 509        |
| 13.1.7    | Geschichtliches .....                                                       | 511        |
| 13.2      | Reversibel vernetzte Elastomere/Thermoplastische Elastomere TPE ...         | 511        |
| 13.2.1    | Das Wichtigste in Kürze über TPE .....                                      | 511        |
| 13.2.2    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                             | 514        |
| 13.2.3    | Allgemeine Eigenschaften .....                                              | 514        |
| 13.2.4    | Einzeleigenschaften und Anwendungsbeispiele .....                           | 517        |
| 13.2.4.1  | Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis,<br>TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) ..... | 517        |
| 13.2.4.2  | Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis,<br>TPE-S (TPS) .....           | 517        |
| 13.2.4.3  | Thermoplastische Polyester-Elastomere,<br>TPE-E (TPC) .....                 | 518        |
| 13.2.4.4  | Thermoplastische Polyamid-Elastomere,<br>TPE-A (TPA) .....                  | 518        |
| 13.2.4.5  | Thermoplastische Polyurethan-Elastomere,<br>TPE-U (TPU) .....               | 519        |
| 13.2.5    | Der Weg zu den thermoplastischen Elastomeren .....                          | 520        |
| 13.2.5.1  | TPE-O/TPE-V (TPO/TPV) .....                                                 | 520        |
| 13.2.5.2  | TPE-S (TPS) .....                                                           | 521        |
| 13.2.5.3  | TPE-E (TPC) .....                                                           | 521        |
| 13.2.5.4  | TPE-A (TPA) .....                                                           | 521        |
| 13.2.5.5  | TPE-U (TPU) .....                                                           | 522        |
| 13.2.6    | Geschichtliches .....                                                       | 522        |
| <b>14</b> | <b>Schaumstoffe .....</b>                                                   | <b>523</b> |
| 14.1      | Allgemeines über Herstellung und Eigenschaften .....                        | 523        |
| 14.1.1    | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                             | 526        |
| 14.2      | Polystyrol-Schaumstoffe (PS-E) .....                                        | 526        |
| 14.2.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                                               | 526        |

|          |                                                        |     |
|----------|--------------------------------------------------------|-----|
| 14.2.2   | Polystyrol-Hartschaumstoff, Partikel-Schaumstoff ..... | 526 |
| 14.2.2.1 | Eigenschaften .....                                    | 526 |
| 14.2.2.2 | Verarbeitung .....                                     | 527 |
| 14.2.2.3 | Anwendungsbeispiele .....                              | 527 |
| 14.2.3   | Polystyrol-Hartschaumstoff, Extruder-Schaumstoff ..... | 527 |
| 14.2.3.1 | Eigenschaften .....                                    | 527 |
| 14.2.3.2 | Verarbeitung .....                                     | 527 |
| 14.2.3.3 | Anwendungsbeispiele .....                              | 527 |
| 14.2.4   | Polystyrol-Integralschaumstoff .....                   | 527 |
| 14.2.4.1 | Eigenschaften .....                                    | 527 |
| 14.2.4.2 | Verarbeitung (Beispiele) .....                         | 528 |
| 14.2.4.3 | Anwendungsbeispiele .....                              | 528 |
| 14.3     | Polyolefin-Schaumstoffe, PO-Schaumstoffe .....         | 528 |
| 14.3.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                          | 528 |
| 14.3.2   | Eigenschaften .....                                    | 528 |
| 14.3.3   | Verarbeitung (Beispiele) .....                         | 529 |
| 14.3.4   | Anwendungsbeispiele .....                              | 529 |
| 14.4     | Polyurethan-Schaumstoffe, PUR-Schaumstoffe .....       | 529 |
| 14.4.1   | Das Wichtigste in Kürze .....                          | 529 |
| 14.4.2   | PUR-Hartschaumstoffe, (PUR-H) .....                    | 530 |
| 14.4.2.1 | Eigenschaften .....                                    | 530 |
| 14.4.2.2 | Anwendungsbeispiele .....                              | 530 |
| 14.4.3   | PUR-Weichschaumstoffe, (PUR-W) .....                   | 530 |
| 14.4.3.1 | Eigenschaften .....                                    | 530 |
| 14.4.3.2 | Anwendungsbeispiele .....                              | 531 |
| 14.4.4   | PUR-Halbhart-(semiflexible) Schaumstoffe .....         | 531 |
| 14.4.4.1 | Eigenschaften .....                                    | 531 |
| 14.4.4.2 | Anwendungsbeispiele .....                              | 531 |
| 14.4.5   | PUR-Integral-Hartschaumstoffe, (PUR-I) .....           | 531 |
| 14.4.5.1 | Eigenschaften .....                                    | 531 |
| 14.4.5.2 | Anwendungsbeispiele .....                              | 531 |
| 14.4.6   | PUR-Integral-Halbhart- und Weichschaumstoffe .....     | 532 |
| 14.4.6.1 | Eigenschaften .....                                    | 532 |
| 14.4.6.2 | Anwendungsbeispiele .....                              | 532 |
| 14.4.7   | Der Weg zu den Polyurethan-Schaumstoffen .....         | 532 |
| 14.4.7.1 | Polyurethan-Schäumsysteme .....                        | 532 |
| 14.4.7.2 | Chemie der PUR-Schäumsysteme .....                     | 535 |
| 14.4.8   | Geschichtliches .....                                  | 538 |
| 14.5     | Weitere Schaumstoffe .....                             | 539 |
| 14.5.1   | Polyvinylchlorid-Schaumstoffe .....                    | 539 |

|           |                                                                                      |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 14.5.2    | Phenol-Formaldehyd-Schaumstoffe .....                                                | 539        |
| 14.5.3    | Harnstoff-Formaldehyd-Schaumstoffe .....                                             | 539        |
| 14.5.4    | Polymethacrylimid-Schaumstoffe .....                                                 | 540        |
| 14.5.5    | Gummi-Schaumstoffe .....                                                             | 540        |
| 14.6      | Tabellarischer Eigenschaftsvergleich .....                                           | 541        |
| <b>15</b> | <b>Kunststoffe als Sonderwerkstoffe .....</b>                                        | <b>543</b> |
| 15.1      | Elektroaktive Kunststoffe .....                                                      | 543        |
| 15.1.1    | Oberflächenbehandlungen .....                                                        | 544        |
| 15.1.2    | Elektrisch leitfähige Compounds .....                                                | 544        |
| 15.1.3    | Intrinsisch elektrisch leitfähige Polymere .....                                     | 545        |
| 15.1.4    | Polymere als Elektrete .....                                                         | 547        |
| 15.1.5    | Ferroelektrische Polymere (Piezo- und Pyroelektrizität) .....                        | 548        |
| 15.1.6    | Triboelektrizität (Reibungselektrizität) .....                                       | 549        |
| 15.2      | Funktionskunststoffe .....                                                           | 550        |
| 15.2.1    | Polymere als Datenspeicher .....                                                     | 550        |
| 15.2.2    | Polymere Leuchtdioden, Polymer-LEDs (PLEDs) .....                                    | 551        |
| 15.2.3    | Polymere Photovoltaik (PPV) .....                                                    | 552        |
| 15.2.4    | Photoresists .....                                                                   | 554        |
| 15.2.5    | Brennstoffzellen .....                                                               | 555        |
| 15.2.6    | Hybride Polymersysteme .....                                                         | 556        |
| 15.3      | Nanotechnologie und Kunststoffe .....                                                | 557        |
| 15.3.1    | Anwendung von Nanoröhren (CNT) als Zusatzstoffe<br>für Kunststoffe .....             | 558        |
| 15.3.2    | Graphen .....                                                                        | 558        |
| 15.3.3    | Nanotechnologie als Schrittmacher in die Zukunft .....                               | 559        |
| 15.4      | Kunststoffe in der Medizintechnik .....                                              | 560        |
| 15.4.1    | Polymilchsäure, Polylactid (PLA) .....                                               | 560        |
| 15.4.1.1  | Das Wichtigste in Kürze .....                                                        | 560        |
| 15.4.1.2  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                      | 560        |
| 15.4.1.3  | Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendung .....                                         | 560        |
| 15.5      | Biopolymere .....                                                                    | 562        |
| 15.5.1    | Das Wichtigste in Kürze .....                                                        | 562        |
| 15.5.2    | Biokunststoffe – Kunststoffe aus nachwachsenden<br>(biogenen) Rohstoffen (NWR) ..... | 563        |
| 15.5.2.1  | Handelsnamen (Beispiele®) .....                                                      | 563        |
| 15.5.2.2  | Cellulosewerkstoffe .....                                                            | 564        |
| 15.5.2.3  | Stärkewerkstoffe .....                                                               | 565        |
| 15.5.2.4  | Werkstoffe aus dem Bioreaktor .....                                                  | 566        |
| 15.5.2.5  | Werkstoffe durch chemische Synthese biobasierter<br>Rohstoffe .....                  | 568        |

|           |                                                                                            |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.5.2.6  | Biocomposites als Werkstoffe .....                                                         | 568        |
| 15.5.2.7  | Blends als Werkstoffe .....                                                                | 568        |
| 15.5.3    | Biologisch abbaubare Kunststoffe (BAK) .....                                               | 569        |
| 15.5.3.1  | Biokunststoffe neu definiert .....                                                         | 569        |
| 15.5.4    | Anwendungsbeispiele und Ausblick .....                                                     | 569        |
| <b>16</b> | <b>Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen .....</b> | <b>571</b> |
| 16.1      | Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz beim Umgang mit Kunststoffen .....                 | 571        |
| 16.1.1    | Gewerbetoxikologische Begriffe (Auswahl) .....                                             | 571        |
| 16.1.2    | Herstellung von Polymeren und Kunststoff-Formmassen ...                                    | 571        |
| 16.1.3    | Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen .....                                            | 572        |
| 16.1.4    | Anwendung von Kunststoffen .....                                                           | 573        |
| 16.2      | Umweltschutz beim Umgang mit Kunststoffen .....                                            | 574        |
| 16.2.1    | Nachhaltige Entwicklung .....                                                              | 574        |
| 16.2.2    | Abfall- und Recyclinghierarchie .....                                                      | 574        |
| 16.2.3    | Grundsätzliche Aspekte beim Recycling von Kunststoffen ...                                 | 575        |
| 16.2.4    | Recyclingkreisläufe von Kunststoffen .....                                                 | 575        |
| 16.3      | Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie .....                     | 576        |
| 16.3.1    | Werkstoffliches Recycling .....                                                            | 576        |
| 16.3.2    | Rohstoffliches Recycling .....                                                             | 577        |
| 16.3.2.1  | Petrochemische Verfahren .....                                                             | 578        |
| 16.3.2.2  | Solvolytische Verfahren .....                                                              | 578        |
| 16.3.2.3  | Hochofenprozess .....                                                                      | 580        |
| 16.3.3    | Energetische Nutzung .....                                                                 | 580        |
| 16.3.4    | Deponie .....                                                                              | 582        |
| 16.3.5    | Littering alias Vermüllung .....                                                           | 583        |
| 16.3.6    | Codierung erleichtert Recycling .....                                                      | 584        |
| 16.4      | Abbaufähige, resorbierbare Kunststoffe .....                                               | 584        |
| 16.4.1    | Biologisch abbaubare Polymere (BAP) .....                                                  | 584        |
| 16.4.2    | Photoabbaubare Polymere .....                                                              | 585        |
| 16.4.3    | Wasserlösliche Polymere .....                                                              | 585        |
| <b>17</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                          | <b>587</b> |
|           | <b>Sachwortverzeichnis .....</b>                                                           | <b>591</b> |