

# Inhalt

|          |  |          |
|----------|--|----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung in Polymer Engineering</b>                       | <b>1</b> |
| 1.1      | Einteilungen   | 3        |
| 1.1.1    | Einteilung der Werkstoffe                                      | 3        |
| 1.1.2    | Einteilung der Kunststoffe                                     | 4        |
| 1.1.3    | Einteilung der Verbundwerkstoffe                               | 4        |
| 1.1.4    | Hauptmerkmale von Kunststoffen<br>(in Anlehnung an DIN 7724)   | 5        |
| 1.1.5    | Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe                      | 10       |
| 1.1.5.1  | Wirtschaftsdaten zu Thermoplasten                              | 10       |
| 1.1.5.2  | Wirtschaftsdaten zu Duroplasten                                | 10       |
| 1.1.5.3  | Wirtschaftsdaten zu Elastomeren                                | 10       |
| 1.1.5.4  | Preisspanne für Kunststoffe                                    | 12       |
|          | Literatur – Kapitel 1.1  | 12       |
| 1.2      | Synthese (Herstellung, Erzeugung) von Kunststoffen             | 13       |
| 1.2.1    | Übersicht Polymerisation                                       | 13       |
| 1.2.2    | Zuordnung von Kunststoffen zu Polymerisationsarten             | 13       |
| 1.2.3    | Einflüsse der Polymerisation auf die<br>Werkstoffeigenschaften | 16       |
| 1.2.4    | Duroplaste (technische Harze)                                  | 19       |
| 1.2.5    | Abgewandelte Naturstoffe                                       | 20       |
| 1.2.5.1  | Kunststoffe auf Cellulosebasis                                 | 21       |
| 1.2.5.2  | Kunststoffe auf Proteinbasis                                   | 21       |
| 1.2.5.3  | Kunststoffe auf Ligninbasis                                    | 22       |
| 1.2.6    | Kunststofferzeugung (verfahrenstechnische Prozesse)            | 22       |
|          | Literatur – Kapitel 1.2  | 23       |
|          | Weiterführende Literatur – Kapitel 1.2                         | 23       |
| 1.3      | Eigenschaften von Kunststoffen in Bauteilen                    | 23       |
| 1.3.1    | Aufbau der Kunststoffe   | 23       |
| 1.3.1.1  | Chemische Ordnungszustände                                     | 25       |
| 1.3.1.2  | Physikalische Ordnungszustände                                 | 37       |
| 1.3.2    | Mechanische Eigenschaften                                      | 42       |
| 1.3.2.1  | Temperaturabhängigkeit der mechanischen<br>Eigenschaften       | 42       |
| 1.3.2.2  | Verformungsverhalten von Kunststoffen                          | 46       |
| 1.3.2.3  | Verhalten bei Zugbelastung                                     | 47       |
| 1.3.2.4  | Mechanische Dämpfung   | 50       |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 1.3.2.5 | Zeitabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften ..                                  | 50  |
| 1.3.3   | Weitere physikalische Eigenschaften .....   | 53  |
| 1.3.4   | Chemische Eigenschaften .....   | 57  |
| 1.3.4.1 | Beständigkeit gegen Chemikalien/Medien .....  | 57  |
| 1.3.4.2 | Alterung von Kunststoffen .....   | 60  |
| 1.3.4.3 | Schutzmaßnahmen gegen Alterungsvorgänge .....                                       | 62  |
| 1.3.5   | Zusatzstoffe für Kunststoffe .....  | 63  |
|         | Literatur – Kapitel 1.3 .....   | 64  |
|         | Weiterführende Literatur – Kapitel 1.3 .....  | 64  |
| 1.4     | Verarbeitung (Urformen) von Kunststoffen zu Bauteilen .....                         | 65  |
| 1.4.1   | Aufbereitung und Zusatzstoffe (Additive) .....                                      | 65  |
| 1.4.2   | Verarbeitung von Kunststoffschmelzen .....  | 70  |
| 1.4.2.1 | Fließeigenschaften von Schmelzen .....  | 71  |
| 1.4.2.2 | Verformungsverhalten von Schmelzen .....  | 75  |
| 1.4.3   | Verarbeitung von Thermoplasten .....  | 76  |
| 1.4.3.1 | Spritzgießen .....  | 78  |
| 1.4.3.2 | Extrudieren .....   | 83  |
| 1.4.3.3 | Verarbeitungstechniken thermoplastischer<br>Faserverbundwerkstoffe .....            | 87  |
| 1.4.4   | Verarbeitung von Thermoplastischen<br>Elastomeren (TPE) .....                       | 87  |
| 1.4.5   | Verarbeitung von Elastomeren .....  | 88  |
| 1.4.5.1 | Formgebung (Rohlingsverarbeitung) und Vernetzung<br>(Vulkanisation) .....           | 90  |
| 1.4.6   | Verarbeitung von Duroplasten .....  | 90  |
| 1.4.6.1 | Verarbeitungsprinzip .....  | 90  |
| 1.4.6.2 | Typisierung von Duroplasten<br>(härtbare Formmassen) .....                          | 94  |
| 1.4.6.3 | Einteilung der Verarbeitungsverfahren .....   | 94  |
| 1.4.7   | Verarbeitungseinflüsse auf Bauteileigenschaften ....                                | 94  |
| 1.4.7.1 | Bauteileigenschaften .....  | 95  |
| 1.4.7.2 | Einflüsse des Verfahrens und des Kunststoffes<br>auf die Bauteileigenschaften ..... | 101 |
|         | Literatur – Kapitel 1.4 .....   | 101 |
|         | Weiterführende Literatur – Kapitel 1.4 .....  | 103 |
|         | Weiterführende Literatur zu Kapitel 1.4.1 .....                                     | 103 |
|         | Weiterführende Literatur zu Kapitel 1.4.3.1 und 1.4.3.2 .....                       | 103 |
|         | Weiterführende Literatur zu Kapitel 1.4.3.3 .....                                   | 104 |
|         | Weiterführende Literatur zu Kapitel 1.4.7 .....                                     | 104 |
| 1.5     | Kunststoffe und Bauteile .....  | 105 |
| 1.5.1   | Kreislaufwirtschaft und Recycling .....   | 105 |
| 1.5.1.1 | Bauteil-Wiederverwertung .....  | 106 |
| 1.5.1.2 | Möglichkeiten der werkstofflichen Kreislaufführung .....                            | 107 |
| 1.5.1.3 | Rohstoffliche Kreislaufführung .....  | 108 |
| 1.5.1.4 | Verbrennung .....   | 109 |

|                 |   |            |
|-----------------|---|------------|
| 1.5.1.4.1       | Verbrennungskonzepte und -aggregate .....                   | 109        |
| 1.5.1.4.2       | Verbrennung in Kraftwerken .....                            | 109        |
| 1.5.1.4.3       | Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen .....                | 110        |
| 1.5.1.5         | Ausblick .....  | 110        |
| 1.5.2           | Umweltbewertung und -bilanzierung<br>von Kunststoffen ..... | 111        |
| 1.5.2.1         | Ganzheitliche Bilanzierung .....                            | 111        |
|                 | Literatur – Kapitel 1.5 .....                               | 113        |
|                 | Weiterführende Literatur zu Kapitel 1.5 .....               | 113        |
| <b>2</b>        | <b>Synthetische Kunststoffe .....</b>                       | <b>115</b> |
| 2.1             | Thermoplastische Polymere .....                             | 115        |
| 2.1.1           | Polyolefine (PO) .....                                      | 116        |
| 2.1.1.1         | Polyethylen (PE) .....                                      | 118        |
| 2.1.1.1.1       | PE-LD und PE-HD .....                                       | 120        |
| 2.1.1.1.1.1     | Synthese und Compoundierung .....                           | 120        |
| 2.1.1.1.1.1.1   | Synthese .....  | 120        |
| 2.1.1.1.1.1.2   | Struktur und Morphologie .....                              | 124        |
| 2.1.1.1.1.1.3   | Compound und Blend .....                                    | 124        |
| 2.1.1.1.1.2     | Eigenschaften .....   | 130        |
| 2.1.1.1.1.2.1   | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....                      | 130        |
| 2.1.1.1.1.2.2   | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....                      | 147        |
| 2.1.1.1.1.2.3   | Elektrische, optische, akustische Eigenschaften .....       | 150        |
| 2.1.1.1.1.3     | Verarbeitung und Anwendung von PE .....                     | 152        |
| 2.1.1.1.1.3.1   | Urformen .....  | 152        |
| 2.1.1.1.1.3.2   | Umformen .....  | 154        |
| 2.1.1.1.1.3.3   | Fügen .....   | 156        |
| 2.1.1.1.1.3.4   | Veredelung .....  | 158        |
| 2.1.1.1.1.4     | Gesundheit und Umwelt .....                                 | 159        |
| 2.1.1.1.1.5     | Handelsnamen .....  | 160        |
| 2.1.1.1.2       | PE-LLD .....  | 161        |
| 2.1.1.1.2.1     | Synthese und Compoundierung .....                           | 162        |
| 2.1.1.1.2.1.1   | Synthese .....  | 162        |
| 2.1.1.1.2.1.2   | Struktur und Morphologie .....                              | 162        |
| 2.1.1.1.2.2     | Eigenschaften .....   | 163        |
| 2.1.1.1.2.3     | Verarbeitung und Anwendung .....                            | 165        |
| 2.1.1.1.2.4     | Handelsnamen .....  | 171        |
| 2.1.1.1.3       | PE-UHMW .....   | 172        |
| 2.1.1.1.3.1     | Technisches PE-UHMW .....                                   | 172        |
| 2.1.1.1.3.1.1   | Synthese und Compoundierung .....                           | 172        |
| 2.1.1.1.3.1.1.1 | Synthese .....  | 172        |
| 2.1.1.1.3.1.1.2 | Compound und Blend .....                                    | 172        |
| 2.1.1.1.3.1.2   | Eigenschaften .....   | 173        |
| 2.1.1.1.3.1.3   | Verarbeitung und Anwendung .....                            | 176        |
| 2.1.1.1.3.1.4   | Handelsnamen .....  | 178        |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| 2.1.1.1.3.2   | Medizinisches PE-UHMW – Polyethylen<br>als Implantatwerkstoff .....             | 178 |
| 2.1.1.1.3.2.1 | Chemisch unvernetztes medizinisches Standard<br>Polyethylen als Werkstoff ..... | 178 |
| 2.1.1.1.3.2.2 | PE-UHMW als Implantat-Komponenten .....   | 181 |
| 2.1.1.1.3.2.3 | Chemisch hochvernetztes medizinisches PE-UHMW .....                             | 183 |
| 2.1.1.1.4     | Polyethylen-Modifikationen .....  | 186 |
| 2.1.1.1.4.1   | Vernetztes Polyethylen (PE-X) .....   | 186 |
| 2.1.1.1.4.2   | Chlorierte Polyolefine .....  | 191 |
| 2.1.1.1.4.2.1 | Chloriertes Polyethylen (PE-C)<br>(thermoplastisches Elastomer) .....           | 191 |
| 2.1.1.1.4.2.2 | Vernetzte chlorierte Polyolefine (PE-CX) .....                                  | 195 |
| 2.1.1.1.4.3   | Sulfochloriertes Polyethylen .....  | 196 |
| 2.1.1.1.4.4   | Phosphorylierung, Sulfophosphorylierung,<br>Sulfierung, Oxidation .....         | 197 |
| 2.1.1.1.4.5   | Copolymere des Ethylens .....   | 197 |
| 2.1.1.1.4.5.1 | Ethylen/Vinylacetat-Copolymere (EVAC) .....                                     | 197 |
| 2.1.1.1.4.5.2 | Ethylen/Vinylalkohol-Copolymere (EVOH) .....                                    | 202 |
| 2.1.1.1.4.5.3 | Ethylen/Ethylacrylat-Copolymere (EEAK) .....                                    | 203 |
| 2.1.1.1.4.5.4 | Ethylen/Methylacrylat-Copolymere (EMA) .....                                    | 205 |
| 2.1.1.1.4.5.5 | Ethylen/Acrylsäure-Copolymere (EAA) .....                                       | 206 |
| 2.1.1.1.4.5.6 | Ethylen/Butylacrylat-Copolymere (EBA) .....                                     | 207 |
| 2.1.1.1.4.6   | Abbaubare Polyethylene und andere Kunststoffe ....                              | 209 |
| 2.1.1.1.5     | Literatur – Kapitel 2.1.1.1 .....   | 210 |
| 2.1.1.2       | Polypropylen .....  | 213 |
| 2.1.1.2.1     | Synthese und Compoundierung .....   | 213 |
| 2.1.1.2.1.1   | Synthese .....  | 213 |
| 2.1.1.2.1.2   | Struktur und Morphologie .....  | 216 |
| 2.1.1.2.1.3   | Compound und Blend .....  | 221 |
| 2.1.1.2.2     | Eigenschaften .....   | 226 |
| 2.1.1.2.2.1   | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....  | 226 |
| 2.1.1.2.2.2   | Reibverhalten, Beständigkeit und Sperrfähigkeit ...                             | 237 |
| 2.1.1.2.2.3   | Elektrische, optische, akustische Eigenschaften ....                            | 238 |
| 2.1.1.2.3     | Verarbeitung und Anwendung .....  | 239 |
| 2.1.1.2.3.1   | Urformen .....  | 240 |
| 2.1.1.2.3.2   | Umformen .....  | 243 |
| 2.1.1.2.3.3   | Fügen .....   | 243 |
| 2.1.1.2.3.4   | Veredelung .....  | 244 |
| 2.1.1.2.4     | Gesundheit und Umwelt .....   | 244 |
| 2.1.1.2.5     | Handelsnamen .....  | 249 |
| 2.1.1.2.6     | Literatur – Kapitel 2.1.1.2 .....   | 251 |
| 2.1.1.3       | Polybuten-1 (PB) .....  | 254 |
| 2.1.1.4       | Polyisobutylen (PIB) .....  | 261 |
| 2.1.1.5       | Poly-4-methylpenten-1 (PMP) .....   | 264 |
| 2.1.1.6       | Andere aliphatische Polyolefine .....   | 268 |
| 2.1.1.7       | Ionomere .....  | 269 |
| 2.1.1.8       | Cycloolefinopolymere (COC) .....  | 273 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 2.1.1.9     | Verbundwerkstoffe auf Basis Kohlenstoff-Polyolefin           | 279 |
|             | Literatur – Kapitel 2.1.1.3 – 2.1.1.9                        | 280 |
| 2.1.2       | Vinylpolymere  | 281 |
| 2.1.2.1     | Polyvinylchlorid (PVC)                                       | 282 |
| 2.1.2.1.1   | Synthese und Compoundierung                                  | 282 |
| 2.1.2.1.1.1 | Synthese (PVC)   | 282 |
| 2.1.2.1.1.2 | Struktur   | 284 |
| 2.1.2.1.1.3 | Rohstoffeigenschaften  | 284 |
| 2.1.2.1.1.4 | Additive und Zuschlagstoffe (PVC)                            | 286 |
| 2.1.2.1.1.5 | Compound und Blend (PVC)                                     | 292 |
| 2.1.2.1.2   | Eigenschaften (PVC)  | 293 |
| 2.1.2.1.2.1 | Thermo-Mechanische Eigenschaften                             | 293 |
| 2.1.2.1.2.2 | Beständigkeiten und Sperrfähigkeit (PVC)                     | 305 |
| 2.1.2.1.2.3 | Elektrische und optische Eigenschaften (PVC)                 | 308 |
| 2.1.2.1.2.4 | Sonstige Eigenschaften (PVC)                                 | 312 |
| 2.1.2.1.3   | Verarbeitung und Anwendung (PVC)                             | 312 |
| 2.1.2.1.3.1 | Urformen (PVC)   | 315 |
| 2.1.2.1.3.2 | Pastenverarbeitung (PVC)                                     | 316 |
| 2.1.2.1.3.3 | Schäumen (PVC)   | 317 |
| 2.1.2.1.3.4 | Bearbeiten (PVC)   | 317 |
| 2.1.2.1.3.5 | Fügen (PVC)  | 317 |
| 2.1.2.1.3.6 | Veredelung (PVC)   | 320 |
| 2.1.2.1.3.7 | Anwendungsbeispiele (PVC)                                    | 320 |
| 2.1.2.1.4   | Sicherheit, Umwelt und Recycling (PVC)                       | 322 |
| 2.1.2.1.4.1 | Sicherheit   | 322 |
| 2.1.2.1.4.2 | Recycling (PVC)  | 323 |
| 2.1.2.1.5   | Sortiment (PVC)  | 327 |
| 2.1.2.1.5.1 | Lieferformen (PVC)   | 327 |
| 2.1.2.1.5.2 | Typisierung (PVC)  | 327 |
| 2.1.2.1.5.3 | Handelsnamen   | 327 |
| 2.1.2.1.6   | Literatur – Kapitel 2.1.2.1                                  | 328 |
| 2.1.2.2     | Polyvinylchlorid-Modifikationen                              | 329 |
| 2.1.2.2.1   | Erhöhung der Schlagzähigkeit (PVC)                           | 331 |
|             | Literatur – Kapitel 2.1.2.2.1 (PVC)                          | 339 |
| 2.1.2.2.2   | Höhere Wärmeformbeständigkeit (PVC)                          | 339 |
|             | Literatur  | 342 |
| 2.1.2.2.3   | Modifikation mit speziellen PVC-Typen                        | 342 |
| 2.1.2.2.3.1 | PVC-Modifikationen mit VC-VAc-Copolymeren                    | 343 |
| 2.1.2.2.3.2 | PVC-Modifikationen mit speziellen E-PVC-Typen                | 344 |
| 2.1.2.2.3.3 | Oberflächenmodifizierung mit<br>„hochmolekularem PVC“        | 346 |
| 2.1.2.2.3.4 | PVC-Modifikation mit kautschukreichen<br>PVC-Pfropfpolymeren | 348 |
|             | Literatur – Kapitel 2.1.2.2.3                                | 350 |
| 2.1.2.2.4   | Barriereeigenschaftsänderungen<br>mit Mehrschichtfolien      | 351 |
|             | Literatur  | 361 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| 2.1.2.2.5     | PVC – Naturfaser – Verbunde .....  | 361 |
|               | Literatur – Kapitel 2.1.2.2.5 .....  | 367 |
| 2.1.3         | Styrolpolymere (PS) .....  | 369 |
| 2.1.3.1       | Styrol-Homopolymere (PS) .....   | 371 |
| 2.1.3.2       | Styrol-Copolymere .....  | 388 |
| 2.1.3.2.1     | Schlagzähmodifizierte Polystyrole .....  | 388 |
| 2.1.3.2.1.1   | Styrol/Butadien-Pfropfcopolymere (SB) .....  | 392 |
| 2.1.3.2.1.2   | Styrol/Butadien/Styrol-Blockcopolymere (SBS) .....                                     | 401 |
| 2.1.3.2.1.3   | Thermoplastische Styrol/Butadien-Elastomere (SBS-TE) .....                             | 412 |
| 2.1.3.2.1.4   | Styrol/ $\alpha$ -Methylstyrolcopolymere (S/MS) .....                                  | 419 |
| 2.1.3.2.1.5   | Styrol/Maleinsäureanhydrid (S/MSA) .....   | 419 |
| 2.1.3.2.1.6   | Styrol/Methylmethacrylat (S/MMA) .....   | 420 |
| 2.1.3.2.2     | Styrol/Acrylnitrilcopolymere (SAN) .....   | 420 |
| 2.1.3.2.2.1   | SAN-Modifikationen .....   | 433 |
| 2.1.3.2.2.1.1 | Acrylnitril/Polybutadien/Styrolpfropfcopolymere (ABS) .....                            | 433 |
| 2.1.3.2.2.1.2 | Pfropfcopolymere aus MMA, SB und ABS (MABS) ..   | 443 |
| 2.1.3.2.3     | Styrol - Polyblends .....  | 448 |
| 2.1.3.2.3.1   | Polymerblends aus (ABS + PC) .....   | 448 |
| 2.1.3.2.3.2   | Acrylnitril/Styrol/Acrylester-Pfropfcopolymere (ASA) .....                             | 455 |
| 2.1.3.2.3.3   | Polymerblends aus ASA und Polycarbonat (ASA + PC) .....                                | 467 |
| 2.1.3.3       | Literatur – Kapitel 2.1.3 .....  | 472 |
| 2.1.4         | Polyacrylate .....   | 475 |
| 2.1.4.1       | Polyacrylnitril (PAN) .....  | 476 |
| 2.1.4.1.1     | Synthese und Compoundierung .....  | 476 |
| 2.1.4.1.1.1   | Synthese .....   | 476 |
| 2.1.4.1.1.2   | Struktur und Morphologie .....   | 477 |
| 2.1.4.1.2     | Eigenschaften .....  | 477 |
| 2.1.4.2       | Acrylnitril-Copolymere mit geringer<br>Gasdurchlässigkeit (Barriere-Kunststoffe) ..... | 478 |
| 2.1.4.2.1     | Styrol/Acrylnitrilcopolymer SAN .....  | 478 |
| 2.1.4.2.2     | Acrylnitril-Methyl-Acrylat-Copolymerisate .....  | 479 |
| 2.1.4.2.2.1   | Eigenschaften .....  | 479 |
| 2.1.4.2.2.2   | Verarbeitung .....   | 481 |
| 2.1.4.2.2.3   | Handelsnamen .....   | 481 |
| 2.1.4.3       | Polymethylmethacrylat (PMMA) .....   | 482 |
| 2.1.4.3.1     | Synthese und Compoundierung .....  | 482 |
| 2.1.4.3.2     | Eigenschaften .....  | 484 |
| 2.1.4.3.2.1   | Thermo-mechanische Eigenschaften .....   | 485 |
| 2.1.4.3.2.2   | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....   | 492 |
| 2.1.4.3.2.3   | Elektrische, optische, akustische Eigenschaften .....                                  | 495 |
| 2.1.4.3.3     | Verarbeitung und Anwendung .....   | 497 |
| 2.1.4.4       | PMMA/ABS Blends .....  | 500 |
| 2.1.4.5       | Polymethylmethacrylimid (PMMI) .....   | 501 |
| 2.1.4.6       | MBS-Polymerisat .....  | 501 |
| 2.1.4.7       | Polymethacrylimid (PMI) .....  | 501 |
| 2.1.4.7.1     | Synthese und Compoundierung .....  | 501 |
| 2.1.4.7.1.1   | Herstellung von ROHACELL® .....  | 501 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 2.1.4.7.2   | Eigenschaften .....   | 502 |
| 2.1.4.8     | Literatur – Kapitel 2.1.4 .....   | 503 |
| 2.1.5       | Polyacetal (POM) .....  | 505 |
| 2.1.5.1     | Synthese und Aufbereitung (Compoundierung) ....   | 506 |
| 2.1.5.2     | Eigenschaften .....   | 510 |
| 2.1.5.2.1   | Physikalische Eigenschaften .....   | 510 |
| 2.1.5.2.2   | Mechanische Eigenschaften: Kurzzeitverhalten<br>bei geringer Verformungsgeschwindigkeit ..... | 510 |
| 2.1.5.2.3   | Thermische Eigenschaften .....  | 528 |
| 2.1.5.2.4   | Elektrische Eigenschaften .....   | 529 |
| 2.1.5.2.5   | Optische Eigenschaften .....  | 531 |
| 2.1.5.2.6   | Chemische und technologische Beständigkeit .....  | 531 |
| 2.1.5.2.6.1 | Chemikalienbeständigkeit .....  | 531 |
| 2.1.5.2.6.2 | Wasseraufnahme .....  | 531 |
| 2.1.5.2.6.3 | Spannungsrisssverhalten .....   | 532 |
| 2.1.5.2.6.4 | Witterungsbeständigkeit .....   | 532 |
| 2.1.5.2.6.5 | Strahlenbeständigkeit .....   | 532 |
| 2.1.5.2.6.6 | Brennbarkeit .....  | 533 |
| 2.1.5.2.6.7 | Durchlässigkeit für Gase und Dämpfe .....   | 533 |
| 2.1.5.2.6.8 | Verhalten gegenüber Kraftstoffen .....  | 533 |
| 2.1.5.3     | Verarbeitung .....  | 535 |
| 2.1.5.3.1   | Urformen .....  | 535 |
| 2.1.5.3.2   | Veredelung der Oberfläche .....   | 536 |
| 2.1.5.3.2.1 | Heißprägen .....  | 536 |
| 2.1.5.3.2.2 | Metallisieren .....   | 537 |
| 2.1.5.3.2.3 | Bedrucken, Lackieren, Bemalen .....   | 537 |
| 2.1.5.3.3   | Spanende Bearbeitung .....  | 538 |
| 2.1.5.3.4   | Fügeverfahren .....   | 538 |
| 2.1.5.4     | Gesundheit und Recycling .....  | 539 |
| 2.1.5.4.1   | Gesundheitliche Beurteilung .....   | 539 |
| 2.1.5.4.2   | Sterilisieren .....   | 539 |
| 2.1.5.4.3   | Recycling .....   | 540 |
|             | Literatur – Kapitel 2.1.5 .....   | 540 |
|             | Weiterführende Literatur Kapitel 2.1.5 .....  | 541 |
| 2.1.6       | Fluorkunststoffe .....  | 543 |
| 2.1.6.1     | Polytetrafluorethylen (PTFE) .....  | 544 |
| 2.1.6.2     | Tetrafluorethylen/Hexafluorpropylencopolymer (FEP)  | 565 |
| 2.1.6.3     | Tetrafluorethylen/Ethylencopolymer (E/TFE) .....  | 574 |
| 2.1.6.4     | Polytrifluorchlorethylen (PCTFE) .....  | 580 |
| 2.1.6.5     | Polyvinylfluorid (PVF) .....  | 584 |
| 2.1.6.6     | Polyvinylidenfluorid (PVDF) .....   | 587 |
| 2.1.6.7     | Thermoplastische Fluorelastomere .....  | 595 |
| 2.1.6.8     | Literatur – Kapitel 2.1.6 .....   | 596 |
| 2.2         | Polykondensate .....  | 597 |
| 2.2.1       | Thermoplastische Polykondensate .....   | 599 |
| 2.2.1.1     | Polyamide (PA) .....  | 604 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| 2.2.1.1.1     | Allgemeine Stoffbeschreibung .....   | 604 |
| 2.2.1.1.1.1   | Nomenklatur .....  | 605 |
| 2.2.1.1.2     | Aliphatische Polyamide .....   | 607 |
| 2.2.1.1.2.1   | Struktur und allgemeine Eigenschaften .....                                  | 609 |
| 2.2.1.1.2.2   | Eigenschaften .....  | 616 |
| 2.2.1.1.2.3   | Verarbeitung .....   | 648 |
| 2.2.1.1.2.4   | Sicherheit, Umwelt und Recycling .....                                       | 654 |
| 2.2.1.1.3     | Partiell aromatische Polyamide .....   | 655 |
| 2.2.1.1.3.1   | Polyarylamide: Arylamid PA MXD 6 .....                                       | 655 |
| 2.2.1.1.3.1.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur .....                    | 655 |
| 2.2.1.1.3.1.2 | Eigenschaften .....  | 656 |
| 2.2.1.1.3.1.3 | Verarbeitung .....   | 659 |
| 2.2.1.1.3.2   | Polyamid 6/6 T .....   | 660 |
| 2.2.1.1.3.2.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Struktur und<br>allgemeine Eigenschaften ..... | 660 |
| 2.2.1.1.3.2.2 | Eigenschaften .....  | 661 |
| 2.2.1.1.3.2.3 | Beständigkeit .....  | 672 |
| 2.2.1.1.3.2.4 | Elektrische Eigenschaften .....  | 672 |
| 2.2.1.1.3.2.5 | Verarbeitung .....   | 673 |
| 2.2.1.1.3.3   | Polyphthalamid PPA .....   | 676 |
| 2.2.1.1.3.3.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Struktur und<br>allgemeine Eigenschaften ..... | 676 |
| 2.2.1.1.3.3.2 | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....                                       | 677 |
| 2.2.1.1.3.3.3 | Beständigkeit .....  | 682 |
| 2.2.1.1.3.3.4 | Verarbeitung .....   | 686 |
| 2.2.1.1.3.4   | Weitere partiell aromatische Polyamide .....                                 | 688 |
| 2.2.1.1.3.4.1 | Eigenschaften .....  | 689 |
| 2.2.1.1.4     | Modifizierte Polyamide .....   | 689 |
| 2.2.1.1.4.1   | Flexible Polyamide .....   | 689 |
| 2.2.1.1.4.1.1 | Verarbeitung .....   | 690 |
| 2.2.1.1.4.1.2 | Anwendungsbeispiele .....  | 691 |
| 2.2.1.1.4.2   | Copolyamide .....  | 692 |
| 2.2.1.1.4.2.1 | Verarbeitung .....   | 692 |
| 2.2.1.1.5     | Thermoplastische Polyamid-Elastomere .....                                   | 692 |
| 2.2.1.1.5.1   | PA 12-Elastomere .....   | 693 |
| 2.2.1.1.5.1.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur .....                    | 694 |
| 2.2.1.1.5.1.2 | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....                                       | 695 |
| 2.2.1.1.5.1.3 | Verarbeitung .....   | 695 |
| 2.2.1.1.5.2   | PA 11-Elastomer .....  | 695 |
| 2.2.1.1.5.2.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur .....                    | 695 |
| 2.2.1.1.6     | Guss-Polyamide und Polyamid-RIM-Systeme .....                                | 697 |
| 2.2.1.1.6.1   | Allgemeine Eigenschaften .....   | 697 |
| 2.2.1.1.6.1.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung, Synthese und Struktur .....                    | 697 |
| 2.2.1.1.6.1.2 | Verarbeitung .....   | 698 |
| 2.2.1.1.6.2   | Gusspolyamid 6 .....   | 701 |
| 2.2.1.1.6.2.1 | Allgemeine Stoffbeschreibung .....   | 701 |
| 2.2.1.1.6.2.2 | Verarbeitung von $\epsilon$ -Caprolactam zu PA 6-G .....                     | 702 |



|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| 2.2.1.1.6.3     | Gusspolyamid 6/12 (Copolymerisation) .....                                      | 702 |
| 2.2.1.1.6.3.1   | Allgemeine Stoffbeschreibung .....  | 702 |
| 2.2.1.1.6.4     | Elastomermodifiziertes Gusspolyamid 6 (Nyrin <sup>TM</sup> ) .                  | 703 |
| 2.2.1.1.6.4.1   | Allgemeine Stoffbeschreibung .....  | 703 |
| 2.2.1.1.6.4.2   | Verarbeitung .....  | 703 |
| 2.2.1.1.6.4.3   | Anwendungsbeispiele .....   | 703 |
| 2.2.1.1.6.5     | Gusspolyamid 12 .....   | 704 |
| 2.2.1.1.6.5.1   | Allgemeine Stoffbeschreibung .....  | 704 |
| 2.2.1.1.6.5.2   | Verarbeitung von Laurinlactam zu PA 12-G .....                                  | 706 |
| 2.2.1.1.7       | Polymermodifizierte Polyamide .....   | 706 |
| 2.2.1.1.7.1     | Allgemeine Stoffbeschreibung .....  | 706 |
| 2.2.1.1.7.2     | Verarbeitung .....  | 709 |
| 2.2.1.1.8       | Sortiment .....   | 709 |
| 2.2.1.1.9       | Literatur – Kapitel 2.2.1.1 bis 2.2.1.1.4.2 .....                               | 713 |
| 2.2.1.2         | Thermoplastische Polyester .....  | 714 |
| 2.2.1.2.1       | Polycarbonat (PC) .....   | 714 |
| 2.2.1.2.1.1     | Verarbeitung und Anwendung .....  | 738 |
| 2.2.1.2.1.2     | Entwicklungstrends bei aromatischen Polycarbonaten                              | 764 |
| 2.2.1.2.1.2.1   | Optimierung/Erweiterung des PC-Sortiments .....                                 | 764 |
| 2.2.1.2.1.2.2   | PC-Produktion durch Schmelzeumesterung .....                                    | 765 |
| 2.2.1.2.1.2.3   | Polycarbonat für die laseroptische Datenspeicherung                             | 766 |
| 2.2.1.2.1.2.4   | Polycarbonat für die Automobilverschiebung .....                                | 766 |
| 2.2.1.2.1.3     | PC-Cokondensate .....   | 767 |
| 2.2.1.2.1.3.1   | Bisphenol A-Copolycarbonate .....   | 768 |
| 2.2.1.2.1.3.2   | Blockcopolykondensate .....   | 769 |
| 2.2.1.2.1.3.3   | Erhöht wärmeformbeständige Polyestercarbonate (PEC)                             | 769 |
| 2.2.1.2.1.4     | Polycarbonatblends .....  | 771 |
| 2.2.1.2.1.4.1   | Polycarbonat-Styrolcopolymer-Blends (PC + ABS),<br>(PC + ASA) und Analoge ..... | 772 |
| 2.2.1.2.1.4.1   | Polycarbonat-Polyester-Blends(PC + PBT)<br>und (PC + PET) .....                 | 777 |
|                 | Literatur – Kapitel 2.2.1.2.1 .....   | 783 |
|                 | Weiterführende Literatur .....  | 784 |
| 2.2.1.2.2       | Polyalkylenterephthalate .....  | 785 |
| 2.2.1.2.2.1     | Polyethylenterephthalat (PET) .....   | 785 |
| 2.2.1.2.2.1.1   | Synthese .....  | 787 |
| 2.2.1.2.2.1.2   | Eigenschaften .....   | 787 |
| 2.2.1.2.2.1.2.1 | Struktur und Morphologie .....  | 787 |
| 2.2.1.2.2.1.2.2 | Merkmale von teilkristallinem PET .....   | 788 |
| 2.2.1.2.2.1.2.3 | Thermische und Mechanische Eigenschaften .....                                  | 789 |
| 2.2.1.2.2.1.2.4 | Beständigkeiten .....   | 797 |
| 2.2.1.2.2.1.2.5 | Elektrische, optische und akustische Eigenschaften ..                           | 801 |
| 2.2.1.2.2.1.3   | Verarbeitung und Compounding .....  | 802 |
| 2.2.1.2.2.1.3.1 | Additive und Zuschlagstoffe .....   | 802 |
| 2.2.1.2.2.1.3.2 | Verarbeitungsbedingte Polymer-Abbaumechanismen                                  | 806 |
| 2.2.1.2.2.1.4   | Verarbeitung und Anwendung .....  | 807 |
| 2.2.1.2.2.1.4.1 | Bestimmung der intrinsischen Viskosität .....                                   | 807 |

|                  |   |     |
|------------------|---|-----|
| 2.2.1.2.2.1.4.2  | Feuchtegehaltmessung .....  | 807 |
| 2.2.1.2.2.1.4.3  | Trocknung .....   | 808 |
| 2.2.1.2.2.1.4.4  | Thermoplastische Verarbeitung von PET .....                                 | 809 |
| 2.2.1.2.2.1.4.5  | Urformen .....  | 809 |
| 2.2.1.2.2.1.4.6  | Umformen, Fügen und Trennen .....   | 812 |
| 2.2.1.2.2.1.4.7  | Spanende Verarbeitung .....   | 813 |
| 2.2.1.2.2.1.4.8  | Veredelung .....  | 813 |
| 2.2.1.2.2.1.4.9  | Verschäumen von PET .....   | 813 |
| 2.2.1.2.2.1.4.10 | Anwendungsbeispiele .....   | 814 |
| 2.2.1.2.2.1.5    | Sicherheit, Umwelt und Recycling .....                                      | 815 |
| 2.2.1.2.2.1.5.1  | Verarbeitung, Arbeitsplatz .....  | 815 |
| 2.2.1.2.2.1.5.2  | Brandverhalten .....  | 815 |
| 2.2.1.2.2.1.5.3  | Produkte .....  | 815 |
| 2.2.1.2.2.1.5.4  | Recycling .....   | 815 |
| 2.2.1.2.2.1.6    | Handelsnamen .....  | 818 |
| 2.2.1.2.2.1.7    | Lieferformen .....  | 820 |
| 2.2.1.2.2.1.8    | Literatur – Kapitel 2.2.1.2.2.1 .....                                       | 820 |
| 2.2.1.2.2.2      | Polybutylenterephthalat (PBT) .....   | 820 |
| 2.2.1.2.2.2.1    | Synthese und Compoundierung .....   | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.1.1  | Synthese .....  | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.1.2  | Struktur und Morphologie .....  | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.1.3  | Compound und Blend .....  | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.2    | Eigenschaften .....   | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.2.1  | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....                                      | 822 |
| 2.2.1.2.2.2.2.2  | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....                                      | 830 |
| 2.2.1.2.2.2.2.3  | Elektrische, optische, akustische und<br>technologische Eigenschaften ..... | 831 |
| 2.2.1.2.2.2.3    | Verarbeitung und Anwendung .....  | 834 |
| 2.2.1.2.2.2.3.1  | Urformen .....  | 834 |
| 2.2.1.2.2.2.3.2  | Fügen .....   | 838 |
| 2.2.1.2.2.2.3.3  | Spanende Bearbeitung .....  | 839 |
| 2.2.1.2.2.2.3.4  | Veredelung .....  | 839 |
| 2.2.1.2.2.2.4    | Gesundheit und Umwelt .....   | 840 |
| 2.2.1.2.2.2.4.1  | Sicherheitsvorkehrungen bei der Verarbeitung .....                          | 840 |
| 2.2.1.2.2.2.4.2  | Angaben zur Toxikologie, Vorschriften .....                                 | 840 |
| 2.2.1.2.2.2.4.3  | Lebensmittelrechtliche Bestimmungen .....                                   | 840 |
| 2.2.1.2.2.2.4.4  | Lagerung und Transport .....  | 841 |
| 2.2.1.2.2.2.4.5  | Entsorgung .....  | 841 |
| 2.2.1.2.2.2.4.6  | Recycling .....   | 841 |
| 2.2.1.2.2.2.5    | Handelsnamen .....  | 841 |
| 2.2.1.2.2.2.6    | Literatur .....   | 841 |
| 2.2.1.2.2.3      | Thermoplastische Polyesterelastomere (TPE-E) .....                          | 842 |
| 2.2.1.2.2.4      | Polyethylenterephthalat als Barrierekunststoff .....                        | 847 |
| 2.2.1.2.3        | Polyarylate (Polyarylester) .....   | 851 |
| 2.2.1.2.4        | Eigenverstärkende teilkristalline Polymere (LCP) ...                        | 858 |
| 2.2.1.2.4.1      | LCP und Technische Kunststoffe – ein Vergleich ....                         | 875 |
| 2.2.1.2.5        | Polyarylether .....   | 878 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| 2.2.1.2.5.1     | Polyphenylenether (PPE <sub>mod</sub> ) (substituiert, modifiziert)<br>= Polyphenylenetherblends ..... | 879 |
| 2.2.1.2.5.2     | Blend aus Polyamid und Polyphenylenether<br>(mod.) (PA + PPE <sub>mod</sub> ) .....                    | 888 |
|                 | Literatur – Kapitel 2.2.1.2.2.3 – 2.2.1.2.5.2 .....  | 890 |
| 2.2.1.2.6       | Polyarylsulfon und -sulfid .....   | 891 |
| 2.2.1.2.6.1     | Polysulfon (PSU) .....   | 892 |
| 2.2.1.2.6.1.1   | Synthese und Compoundierung .....  | 892 |
| 2.2.1.2.6.1.1.1 | Synthese .....   | 892 |
| 2.2.1.2.6.1.1.2 | Struktur und Morphologie .....   | 892 |
| 2.2.1.2.6.1.1.3 | Compound und Blend .....   | 892 |
| 2.2.1.2.6.1.2   | Eigenschaften .....  | 893 |
| 2.2.1.2.6.1.2.1 | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....   | 893 |
| 2.2.1.2.6.1.2.2 | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....   | 899 |
| 2.2.1.2.6.1.2.3 | Elektrische und optische Eigenschaften .....   | 903 |
| 2.2.1.2.6.1.3   | Verarbeitung und Anwendung .....   | 903 |
| 2.2.1.2.6.1.3.1 | Urformen .....   | 905 |
| 2.2.1.2.6.1.3.2 | Umformen .....   | 905 |
| 2.2.1.2.6.1.3.3 | Fügen .....  | 906 |
| 2.2.1.2.6.1.3.4 | Veredelung .....   | 906 |
| 2.2.1.2.6.1.4   | Gesundheit und Umwelt .....  | 907 |
|                 | Literatur .....  | 907 |
| 2.2.1.2.6.2     | Polyethersulfon (PESU) .....   | 908 |
| 2.2.1.2.6.2.1   | Synthese und Compoundierung .....  | 908 |
| 2.2.1.2.6.2.1.1 | Synthese .....   | 908 |
| 2.2.1.2.6.2.1.2 | Struktur und Morphologie .....   | 908 |
| 2.2.1.2.6.2.1.3 | Compound und Blend .....   | 909 |
| 2.2.1.2.6.2.2   | Eigenschaften .....  | 909 |
| 2.2.1.2.6.2.2.1 | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....   | 910 |
| 2.2.1.2.6.2.2.2 | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....   | 917 |
| 2.2.1.2.6.2.2.3 | Elektrische und optische Eigenschaften .....   | 921 |
| 2.2.1.2.6.2.3   | Verarbeitung und Anwendung .....   | 922 |
| 2.2.1.2.6.2.3.1 | Urformen .....   | 923 |
| 2.2.1.2.6.2.3.2 | Umformen .....   | 924 |
| 2.2.1.2.6.2.3.3 | Fügen .....  | 924 |
| 2.2.1.2.6.2.3.4 | Veredelung .....   | 925 |
| 2.2.1.2.6.2.4   | Gesundheit und Umwelt .....  | 925 |
| 2.2.1.2.6.2.5   | Handelsnamen .....   | 925 |
|                 | Literatur Kapitel 2.2.1.2.6.2 .....  | 926 |
| 2.2.1.2.6.3     | Polyphenylensulfid (PPS) .....   | 926 |
| 2.2.1.2.6.3.1   | Synthese und Compoundierung .....  | 926 |
| 2.2.1.2.6.3.1.1 | Synthese .....   | 926 |
| 2.2.1.2.6.3.1.2 | Struktur und Morphologie .....   | 926 |
| 2.2.1.2.6.3.1.3 | Compound und Blend .....   | 927 |
| 2.2.1.2.6.3.2   | Eigenschaften .....  | 927 |
| 2.2.1.2.6.3.2.1 | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....   | 930 |
| 2.2.1.2.6.3.2.2 | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....   | 939 |

|                 |  |      |
|-----------------|--|------|
| 2.2.1.2.6.3.2.3 | Elektrische, optische und akustische Eigenschaften ..                                  | 940  |
| 2.2.1.2.6.3.3   | Verarbeitung und Anwendung .....   | 941  |
| 2.2.1.2.6.3.3.1 | Urformen .....   | 942  |
| 2.2.1.2.6.3.3.2 | Umformen .....   | 945  |
| 2.2.1.2.6.3.3.3 | Fügen .....  | 946  |
| 2.2.1.2.6.3.3.4 | Veredeln .....   | 947  |
| 2.2.1.2.6.3.4   | Gesundheit und Umwelt .....  | 948  |
| 2.2.1.2.6.3.5   | Handelsnamen .....   | 948  |
| 2.2.1.2.6.3.6   | Literatur Kapitel 2.2.1.2.6.3 .....  | 948  |
| 2.2.1.2.7       | Polyetherketone .....  | 949  |
| 2.2.1.2.7.1     | Aromatische Polyetherketone (PEK, PEEK) .....  | 949  |
| 2.2.1.2.7.2     | Aliphatische Polyetherketone (PEK) .....   | 967  |
|                 | Literatur Kapitel 2.2.1.2.7 .....  | 976  |
| 2.2.1.2.8       | Hochwärmebeständige duro- und thermoplastische<br>Polykondensate und Polyaddukte ..... | 977  |
| 2.2.1.2.8.1     | Polyimide (PI) .....   | 980  |
| 2.2.1.2.8.1.1   | Standard-Polyimid (PI) .....   | 982  |
| 2.2.1.2.8.1.2   | Copolyimide .....  | 995  |
| 2.2.1.2.8.1.2.1 | Poly-oxadiazobenzimidazol .....  | 995  |
| 2.2.1.2.8.1.2.2 | Polybenzimidazol (PBI) .....   | 995  |
| 2.2.1.2.8.1.3   | Gemischt ein- und zweibindige Polymere .....   | 998  |
| 2.2.1.2.8.1.3.1 | Polybismaleinimid .....  | 998  |
| 2.2.1.2.8.1.3.2 | Polyamidimid (PAI) .....   | 1007 |
| 2.2.1.2.8.1.3.3 | Polyetherimid (PEI) .....  | 1017 |
| 2.2.1.2.8.1.3.4 | Polyesterimid .....  | 1028 |
| 2.2.1.2.8.2     | Literatur – Kapitel 2.2.1.2.8 .....  | 1029 |
| 2.2.2           | Duroplastische Polykondensate .....  | 1031 |
| 2.2.2.1         | Phenolharze (Phenoplaste, PF-Harze) .....  | 1033 |
| 2.2.2.1.1       | Allgemeines .....  | 1033 |
| 2.2.2.1.1.1     | Historie .....   | 1033 |
| 2.2.2.1.1.1.1   | Chemie .....   | 1034 |
| 2.2.2.1.1.2     | Novolake .....   | 1034 |
| 2.2.2.1.1.3     | Resole .....   | 1037 |
| 2.2.2.1.1.4     | Herstellung .....  | 1038 |
| 2.2.2.1.1.5     | Umwelt .....   | 1039 |
| 2.2.2.1.1.5.1   | Rohstoffe .....  | 1039 |
| 2.2.2.1.1.5.2   | Recycling .....  | 1039 |
|                 | Literatur .....  | 1040 |
| 2.2.2.1.2       | Anwendungen von Phenolharzen .....   | 1040 |
| 2.2.2.1.2.1     | Härtbare PF-Formmassen .....   | 1041 |
| 2.2.2.1.2.1.1   | Struktur und allgemeine Eigenschaften .....  | 1041 |
| 2.2.2.1.2.1.2   | Aufbereitung/Compoundierung .....  | 1049 |
| 2.2.2.1.2.1.3   | Verarbeitung .....   | 1049 |
|                 | Literatur .....  | 1051 |
| 2.2.2.1.2.2     | Holzwerkstoffe .....   | 1051 |
| 2.2.2.1.2.3     | Lamine .....   | 1052 |
| 2.2.2.1.2.4     | Dämmstoffe .....   | 1053 |

|               |   |      |
|---------------|---|------|
| 2.2.2.1.2.4.1 | Mineralwolle .....  | 1053 |
| 2.2.2.1.2.4.2 | Phenolharzschäume .....                                       | 1053 |
| 2.2.2.1.2.5   | Schleifmittel .....   | 1054 |
| 2.2.2.1.2.6   | Reibbeläge .....  | 1055 |
| 2.2.2.1.2.7   | Feuerfestmaterialien .....                                    | 1056 |
| 2.2.2.1.2.8   | Kohlenstoffbauteile .....                                     | 1056 |
| 2.2.2.1.2.9   | Textilvlies .....   | 1056 |
| 2.2.2.1.2.10  | Coatings .....  | 1057 |
| 2.2.2.1.2.11  | Gummi .....   | 1057 |
| 2.2.2.1.2.12  | Gießerei .....  | 1058 |
| 2.2.2.1.2.13  | Sonstige Anwendungen .....                                    | 1058 |
| 2.2.2.1.2.14  | Zukunft .....   | 1058 |
|               | Literatur .....   | 1059 |
| 2.2.2.2       | Harnstoff/Formaldehyd-Kunststoffe (Aminoplaste)<br>(UF) ..... | 1059 |
| 2.2.2.2.1     | Härtbare UF-Formmassen .....                                  | 1060 |
| 2.2.2.2.2     | Technische Harnstoffharze .....                               | 1066 |
| 2.2.2.3       | Melamin/Formaldehyd-Kunststoffe (MF) .....                    | 1067 |
| 2.2.2.3.1     | Härtbare MF-Formmassen .....                                  | 1068 |
| 2.2.2.3.2     | Modifizierte MF-Formmassen .....                              | 1071 |
| 2.2.2.3.2.1   | Härtbare Melamin/Phenol/Formaldehyd-Formmassen .....          | 1071 |
| 2.2.2.3.2.2   | Technische Melaminharze .....                                 | 1072 |
| 2.2.2.4       | Ungesättigte Polyesterharze (UP) .....                        | 1073 |
| 2.2.2.4.1     | Synthese und Compoundierung .....                             | 1075 |
| 2.2.2.4.1.1   | Synthese .....  | 1075 |
| 2.2.2.4.1.2   | Struktur und Morphologie .....                                | 1081 |
| 2.2.2.4.1.3   | Compound und Blend .....                                      | 1082 |
| 2.2.2.4.2     | Eigenschaften .....   | 1085 |
| 2.2.2.4.2.1   | Thermo-Mechanische Eigenschaften .....                        | 1085 |
| 2.2.2.4.2.2   | Beständigkeit und Sperrfähigkeit .....                        | 1096 |
| 2.2.2.4.2.3   | Elektrische, optische und akustische Eigenschaften ..         | 1098 |
| 2.2.2.4.3     | Verarbeitung und Anwendung .....                              | 1105 |
| 2.2.2.4.3.1   | Pultrusion (Strangziehverfahren) .....                        | 1107 |
| 2.2.2.4.3.2   | Umformen .....  | 1116 |
| 2.2.2.4.3.3   | Bearbeiten .....  | 1117 |
| 2.2.2.4.3.4   | Fügen .....   | 1117 |
| 2.2.2.4.3.5   | Veredeln .....  | 1118 |
| 2.2.2.4.3.6   | Anwendungsbeispiele .....                                     | 1118 |
| 2.2.2.4.4     | Sicherheit, Umwelt und Recycling .....                        | 1118 |
| 2.2.2.4.5     | Sortiment .....   | 1120 |
| 2.2.2.4.6     | Literatur – Kapitel 2.2.2.4 .....                             | 1122 |
| 2.2.2.5       | Verwandte Reaktionsharz-Formmassen .....                      | 1123 |
| 2.2.2.5.1     | Alkydharz-Formmassen .....                                    | 1123 |
| 2.2.2.5.2     | Polydiallylphthalat-Formmassen (PDAP) .....                   | 1123 |
| 2.2.2.6       | Silicone (SI) .....   | 1127 |
| 2.2.2.6.1     | Einleitung .....  | 1127 |
| 2.2.2.6.2     | Herstellung .....   | 1128 |

|             |  |      |
|-------------|--|------|
| 2.2.2.6.2.1 | Müller-Rochow-Synthese .....                       | 1128 |
| 2.2.2.6.3   | Siliconöle .....                                   | 1130 |
| 2.2.2.6.4   | Siliconharze .....                                 | 1131 |
| 2.2.2.6.5   | RTV-2 Siliconkautschuke .....                      | 1133 |
| 2.2.2.6.6   | RTV-1 Siliconkautschuke .....                      | 1135 |
| 2.2.2.6.7   | HTV-Siliconkautschuke .....                        | 1136 |
| 2.2.2.6.8   | Zusammenfassung der Eigenschaften der Silicone ... | 1138 |
| 2.2.2.6.9   | Markt und Anwendungen für Silicone .....           | 1139 |
| 2.2.2.6.10  | Literatur – Kapitel 2.2.2.6.1 – 2.2.2.6.9 .....    | 1140 |
| 2.2.2.6.11  | Härtbare Siliconharz-Formmassen .....              | 1141 |
| 2.2.2.6.12  | Literatur – Kapitel 2.2.2.6.11 .....               | 1145 |
| 2.3         | Polyaddukte .....                                  | 1147 |
| 2.3.1       | Duroplastische Polyaddukte .....                   | 1147 |
| 2.3.1.1     | Epoxidharze (EP) .....                             | 1148 |
| 2.3.1.2     | Technische Epoxidharze .....                       | 1148 |
| 2.3.1.3     | Prepregs .....                                     | 1169 |
| 2.3.2       | Polyurethane .....                                 | 1170 |
| 2.3.2.1     | Vernetzte Polyurethane (PUR) .....                 | 1170 |
| 2.3.2.1.1   | Isocyanatharze .....                               | 1171 |
| 2.3.2.1.2   | Polyurethan-Gießharz .....                         | 1178 |
| 2.3.2.1.3   | PUR-Integralschaumstoffe .....                     | 1183 |
| 2.3.2.2     | Thermoplastische Polyurethan-Elastomere (TPE-U)    | 1189 |
| 2.3.2.2.1   | Thermoplastische Polyaddukte .....                 | 1199 |
| 2.3.2.2.1.1 | Lineare Polyurethane .....                         | 1199 |
| 2.3.3       | Literatur – Kapitel 2.3 .....                      | 1200 |
| 3           | <b>Elastomere</b> .....                            | 1203 |
| 3.1         | Marktwirtschaftliche Betrachtungen .....           | 1203 |
| 3.2         | Compounding .....                                  | 1205 |
| 3.2.1       | Füllstoffe .....                                   | 1205 |
| 3.2.2       | Alterungsschutz .....                              | 1206 |
| 3.2.3       | Weichmacher .....                                  | 1208 |
| 3.2.4       | Vernetzungssysteme .....                           | 1210 |
| 3.2.4.1     | Schwefelvernetzung .....                           | 1212 |
| 3.2.4.2     | Peroxidvernetzung .....                            | 1214 |
| 3.3         | Verarbeitung .....                                 | 1215 |
| 3.4         | Elastomere Werkstoffeigenschaften .....            | 1215 |
| 3.4.1       | Medieneinfluss .....                               | 1216 |
| 3.4.2       | Temperatur .....                                   | 1218 |
| 3.5         | Umwelt und Gesundheit .....                        | 1221 |

|         |   |      |
|---------|---|------|
| 3.6     | Elastomere Werkstoffe .....   | 1223 |
| 3.6.1   | Naturkautschuk (NR) .....   | 1223 |
| 3.6.1.1 | Struktur .....  | 1223 |
| 3.6.1.2 | Eigenschaften .....   | 1223 |
| 3.6.1.3 | Verarbeitung .....  | 1224 |
| 3.6.1.4 | Anwendung .....   | 1225 |
| 3.6.1.5 | Handelsnamen .....  | 1225 |
| 3.6.2   | Butadienkautschuk (BR) .....  | 1225 |
| 3.6.2.1 | Struktur .....  | 1225 |
| 3.6.2.2 | Eigenschaften .....   | 1227 |
| 3.6.2.3 | Verarbeitung .....  | 1227 |
| 3.6.2.4 | Anwendung .....   | 1228 |
| 3.6.2.5 | Handelsnamen .....  | 1228 |
| 3.6.3   | Styrolbutadienkautschuk (SBR) .....                                   | 1228 |
| 3.6.3.1 | Struktur .....  | 1228 |
| 3.6.3.2 | Eigenschaften .....   | 1229 |
| 3.6.3.3 | Verarbeitung .....  | 1229 |
| 3.6.3.4 | Anwendung .....   | 1230 |
| 3.6.3.5 | Handelsnamen .....  | 1230 |
| 3.6.4   | Chlorbutadienkautschuk (CR) .....                                     | 1231 |
| 3.6.4.1 | Struktur .....  | 1231 |
| 3.6.4.2 | Eigenschaften .....   | 1231 |
| 3.6.4.3 | Verarbeitung .....  | 1232 |
| 3.6.4.4 | Anwendung .....   | 1232 |
| 3.6.4.5 | Handelsnamen .....  | 1233 |
| 3.6.5   | Acrylnitrilbutadienkautschuk (NBR) .....                              | 1233 |
| 3.6.5.1 | Struktur .....  | 1233 |
| 3.6.5.2 | Eigenschaften .....   | 1233 |
| 3.6.5.3 | Verarbeitung .....  | 1235 |
| 3.6.5.4 | Anwendung .....   | 1235 |
| 3.6.5.5 | Handelsnamen .....  | 1236 |
| 3.6.6   | Hydrierter Acrylnitrilbutadienkautschuk (HNBR) ..                     | 1236 |
| 3.6.6.1 | Struktur .....  | 1236 |
| 3.6.6.2 | Eigenschaften .....   | 1236 |
| 3.6.6.3 | Verarbeitung .....  | 1237 |
| 3.6.6.4 | Anwendung .....   | 1237 |
| 3.6.6.5 | Handelsnamen .....  | 1237 |
| 3.6.7   | Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) .....                          | 1237 |
| 3.6.7.1 | Struktur .....  | 1237 |
| 3.6.7.2 | Eigenschaften .....   | 1238 |
| 3.6.7.3 | Verarbeitung .....  | 1239 |
| 3.6.7.4 | Anwendung .....   | 1240 |
| 3.6.7.5 | Handelsnamen .....  | 1240 |
| 3.6.8   | Butylkautschuk (IIR) und halogenierter<br>Butylkautschuk (XIIR) ..... | 1240 |
| 3.6.8.1 | Struktur .....  | 1240 |
| 3.6.8.2 | Eigenschaften .....   | 1241 |

|          |  |      |
|----------|--|------|
| 3.6.8.3  | Verarbeitung .....                               | 1242 |
| 3.6.8.4  | Anwendung .....                                  | 1242 |
| 3.6.8.5  | Handelsnamen .....                               | 1243 |
| 3.6.9    | Ethylenoxid-Epichlorhydrin-Kautschuk (ECO) ..... | 1243 |
| 3.6.9.1  | Struktur .....                                   | 1243 |
| 3.6.9.2  | Eigenschaften .....                              | 1243 |
| 3.6.9.3  | Verarbeitung .....                               | 1244 |
| 3.6.9.4  | Anwendung .....                                  | 1244 |
| 3.6.9.5  | Handelsnamen .....                               | 1244 |
| 3.6.10   | Acrylatkautschuk (ACM) .....                     | 1245 |
| 3.6.10.1 | Struktur .....                                   | 1245 |
| 3.6.10.2 | Eigenschaften .....                              | 1245 |
| 3.6.10.3 | Verarbeitung .....                               | 1246 |
| 3.6.10.4 | Anwendung .....                                  | 1246 |
| 3.6.10.5 | Handelsnamen .....                               | 1247 |
| 3.6.11   | Ethylenacrylatkautschuk (AEM) .....              | 1247 |
| 3.6.11.1 | Struktur .....                                   | 1247 |
| 3.6.11.2 | Eigenschaften .....                              | 1247 |
| 3.6.11.3 | Verarbeitung .....                               | 1248 |
| 3.6.11.4 | Anwendung .....                                  | 1248 |
| 3.6.11.5 | Handelsnamen .....                               | 1248 |
| 3.6.12   | Fluorkautschuk (FKM) .....                       | 1248 |
| 3.6.12.1 | Struktur .....                                   | 1248 |
| 3.6.12.2 | Eigenschaften .....                              | 1250 |
| 3.6.12.3 | Verarbeitung .....                               | 1250 |
| 3.6.12.4 | Anwendung .....                                  | 1251 |
| 3.6.12.5 | Handelsnamen .....                               | 1251 |
| 3.6.13   | Perfluorkautschuk (FFKM) .....                   | 1252 |
| 3.6.13.1 | Struktur .....                                   | 1252 |
| 3.6.13.2 | Eigenschaften .....                              | 1252 |
| 3.6.13.3 | Verarbeitung .....                               | 1252 |
| 3.6.13.4 | Anwendung .....                                  | 1253 |
| 3.6.13.5 | Handelsnamen .....                               | 1253 |
| 3.6.14   | Silikonkautschuke .....                          | 1253 |
| 3.6.14.1 | Struktur .....                                   | 1253 |
| 3.6.14.2 | Eigenschaften .....                              | 1254 |
| 3.6.14.3 | Verarbeitung .....                               | 1255 |
| 3.6.14.4 | Anwendung .....                                  | 1256 |
| 3.6.14.5 | Handelsnamen .....                               | 1256 |
| 3.6.15   | Polyurethan (AU, EU) .....                       | 1256 |
| 3.6.15.1 | Struktur .....                                   | 1256 |
| 3.6.15.2 | Eigenschaften .....                              | 1257 |
| 3.6.15.3 | Verarbeitung .....                               | 1258 |
| 3.6.15.4 | Anwendung .....                                  | 1258 |
| 3.6.15.5 | Handelsnamen .....                               | 1258 |



|             |   |             |
|-------------|---|-------------|
| 3.7         | Chemikalienbeständigkeit der Polymere .....   | 1258        |
| 3.8         | Literatur .....   | 1268        |
| <b>4</b>    | <b>Spezialkunststoffe .....</b>   | <b>1269</b> |
| 4.1         | Biopolymere .....   | 1269        |
| 4.1.1       | Rohstoffe für biobasierte Monomere und Polymere ..                                    | 1270        |
| 4.1.2       | Stärke und Derivate .....   | 1272        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.2 .....   | 1277        |
| 4.1.3       | Polymilchsäure (PLA) .....  | 1277        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.3 .....   | 1279        |
| 4.1.4       | Polyhydroxyfettsäuren (PHF) .....   | 1280        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.4 .....   | 1283        |
| 4.1.5       | Cellulose und Cellulosederivate .....   | 1283        |
| 4.1.5.1     | Vulkanfiber (VF) .....  | 1284        |
| 4.1.5.2     | Kunststoffe aus abgewandelter Cellulose .....   | 1286        |
| 4.1.5.2.1   | Celluloseester aus anorganischen Säuren .....   | 1286        |
| 4.1.5.2.1.1 | Cellulosenitrat (CN) .....  | 1286        |
| 4.1.5.2.2   | Celluloseester aus aliphatischen Carbonsäuren .....                                   | 1289        |
| 4.1.5.2.2.1 | Celluloseacetat (CA) .....  | 1290        |
| 4.1.5.2.2.2 | Cellulosepropionat (CP) .....   | 1297        |
| 4.1.5.2.2.3 | Celluloseacetobutyrat (CAB) .....   | 1301        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.5 .....   | 1304        |
| 4.1.6       | Thermoplaste auf Ligninbasis .....  | 1304        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.6 .....   | 1307        |
| 4.1.7       | Duroplaste auf Basis nachwachsender Rohstoffe ....                                    | 1307        |
| 4.1.7.1     | Polyurethane (mit Polyolen auf Basis natürlicher<br>Öle/Fette) .....                  | 1307        |
| 4.1.7.2     | Epoxyacrylate auf Basis nachwachsender Rohstoffe ..                                   | 1308        |
| 4.1.7.3     | Weitere Duroplaste und Duroplastanteile auf Basis<br>pflanzlicher Fette und Öle ..... | 1309        |
|             | Literatur – Kapitel 4.1.7 .....   | 1309        |
| 4.1.8       | Naturfaser-Komposite .....  | 1309        |
| 4.1.8.1     | Steigendes Marktinteresse .....   | 1309        |
| 4.1.8.2     | Definition der Biokomposite .....   | 1310        |
| 4.1.8.2.1   | Wood Plastic Composites (WPC) .....   | 1310        |
| 4.1.8.2.2   | Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) .....  | 1310        |
| 4.1.8.3     | Zulieferstrukturen für Naturfasern .....  | 1311        |
| 4.1.8.4     | Matrixmaterialien .....   | 1311        |
| 4.1.8.4.1   | Einleitung .....  | 1311        |
| 4.1.8.5     | Biopolymere .....   | 1312        |
| 4.1.8.5.1   | Überblick über die heute verwendeten<br>Matrixmaterialien .....                       | 1312        |
| 4.1.8.6     | Verstärkungsfasern .....  | 1313        |
| 4.1.8.6.1   | Einleitung .....  | 1313        |

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| 4.1.8.6.2   | Faserarten .....  | 1314 |
| 4.1.8.6.2.1 | Holzmehl .....  | 1314 |
| 4.1.8.6.2.2 | Holzfaseren .....   | 1315 |
| 4.1.8.6.2.3 | Naturfasern .....   | 1315 |
| 4.1.8.6.2.4 | Bastfasern .....  | 1315 |
| 4.1.8.6.2.5 | Cellulose   |      |
|             | Cellulose .....   | 1316 |
| 4.1.8.7     | Additive und Zuschlagstoffe .....                           | 1317 |
| 4.1.8.7.1   | Faser-Matrixhaftung .....                                   | 1317 |
| 4.1.8.7.2   | Verarbeitungshilfsstoffe .....                              | 1317 |
| 4.1.8.7.2.1 | Gleitmittel .....   | 1317 |
| 4.1.8.7.2.2 | Stabilisatoren und Funktionsadditive .....                  | 1318 |
| 4.1.8.8     | Verarbeitung .....  | 1318 |
| 4.1.8.8.1   | Aufbereitung und Compoundierung .....                       | 1318 |
| 4.1.8.8.1.1 | Einleitung .....  | 1318 |
| 4.1.8.8.1.2 | Überlegungen zur Anlagenkonfiguration .....                 | 1319 |
| 4.1.8.8.1   | Profilextrusion .....                                       | 1320 |
| 4.1.8.8.1.1 | Einleitung .....  | 1320 |
| 4.1.8.8.1.2 | Verarbeitungseigenschaften .....                            | 1320 |
| 4.1.8.8.2   | Spritzgießverarbeitung .....                                | 1321 |
| 4.1.8.8.2.1 | Allgemeines .....   | 1321 |
| 4.1.8.8.2.1 | Verarbeitungseigenschaften .....                            | 1322 |
| 4.1.8.8.4   | Fügen .....   | 1323 |
| 4.1.8.9     | Eigenschaften .....   | 1324 |
| 4.1.8.9.1.1 | Mechanischen Eigenschaften .....                            | 1324 |
| 4.1.8.9.1.3 | E-Modul von holzfaserverstärkten Kompositen .....           | 1325 |
| 4.1.8.9.1.3 | E-Modul von hanffaserverstärkten Kompositen .....           | 1327 |
| 4.1.8.9.1.4 | Festigkeiten von holzfaserverstärkten Kompositen ..         | 1327 |
| 4.1.8.9.1.5 | Schlagzähigkeiten von holzfaserverstärkten Kompositen ..... | 1327 |
| 4.1.8.9.1.6 | Bruchdehnung von hanffaserverstärkten Kompositen .....      | 1328 |
| 4.1.8.9.2   | Wasseraufnahme .....  | 1328 |
| 4.1.8.9.3   | Dielektrische Eigenschaften von Naturfaser-Compounds .....  | 1329 |
| 4.1.8.9.4   | Emissionen .....  | 1330 |
| 4.1.8.9.5   | Optisches Erscheinungsbild .....                            | 1331 |
| 4.1.8.9.6   | Anwendungen .....   | 1332 |
| 4.1.8.10    | Wirtschaftliche Betrachtung und Marktbedeutung ..           | 1332 |
| 4.1.8.11    | Literatur – Kapitel 4.1.8 .....                             | 1333 |
| 4.2         | Elektrisch leitfähige Polymere .....                        | 1334 |
| 4.2.1       | Intrinsisch leitfähige Polymere .....                       | 1334 |
| 4.2.2       | Elektrisch leitfähige gefüllte Polymere .....               | 1336 |
| 4.2.2.1     | Eigenschaften .....   | 1336 |
| 4.2.3       | Elektrisch leitfähige beschichtete Polymere .....           | 1343 |
| 4.2.4       | Literatur – Kapitel 4.2 .....                               | 1344 |

---

|          |  |      |
|----------|--|------|
| <b>5</b> | <b>Anhang</b> .....                                | 1347 |
| 5.1      | Kurzzeichen für Kunststoffe .....                  | 1348 |
| 5.2      | Kunststoffkennwerte, Tabellenverzeichnis .....     | 1375 |
| <b>6</b> | <b>Datenbanken</b> .....                           | 1401 |
| 6.1      | Datenbankanbieter .....                            | 1401 |
| 6.2      | Patentdatenbanken .....                            | 1402 |
| 6.3      | Weitere Internetquellen: .....                     | 1403 |
|          | <b>Handelsnamenverzeichnis</b> .....               | 1407 |
|          | <b>Kunststoff- und Hilfsstoffverzeichnis</b> ..... | 1423 |
|          | <b>Stichwortverzeichnis</b> .....                  | 1441 |