

# Inhalt

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Einleitung</b> .....                                                                    | V  |
| <b>Vorwort</b> .....                                                                       | V  |
| <b>Zum Inhalt des Buches</b> .....                                                         | VI |
| <b>Danksagung</b> .....                                                                    | IX |
| <br>                                                                                       |    |
| <b>1 Temperatureinsatzbereich</b> .....                                                    | 1  |
| 1.1 Phasenübergänge bei Kunststoffen .....                                                 | 1  |
| 1.1.1 Der Übergang vom festen in den geschmolzenen Zustand .....                           | 1  |
| 1.1.2 Die Volumenänderung beim Phasenübergang von der Schmelze<br>zum festen Zustand ..... | 5  |
| 1.1.3 Phasenübergänge am starren Körper .....                                              | 6  |
| 1.2 Die Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte von Kunststoffen .....                | 8  |
| 1.2.1 Der Vergleich mit anderen Werkstoffgruppen .....                                     | 8  |
| 1.2.2 Die thermische Ausdehnung .....                                                      | 9  |
| 1.2.3 Temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten .....                              | 12 |
| 1.3 Der Einsatztemperaturbereich .....                                                     | 14 |
| 1.3.1 Tatsächlich wirkende Temperaturen .....                                              | 14 |
| 1.3.2 Temperaturabhängige Lasteinwirkung .....                                             | 15 |
| 1.3.3 Die Notwendigkeit von einsatznahen Funktionsuntersuchungen .....                     | 17 |
| 1.4 Der Einfluss der Geometrie auf die Temperaturbeständigkeit .....                       | 18 |
| 1.4.1 Aussagefähigkeit der Rohstoffkennwerte .....                                         | 18 |
| 1.4.2 Betrachtete Geometrie .....                                                          | 19 |
| 1.4.3 Modifikation der Wanddicke .....                                                     | 20 |
| 1.4.4 Belastungsdauer und Durchwärmung der Produkte .....                                  | 21 |
| 1.4.5 Bessere Wärmestandfestigkeit durch Faserverstärkung .....                            | 22 |
| 1.4.6 Werkstoffkombination .....                                                           | 23 |
| 1.4.7 Einseitige Kühlung am Erzeugnis .....                                                | 23 |
| 1.4.8 Zusätzliche Versteifungen gegen die thermisch bedingte Biegung .....                 | 25 |
| <br>                                                                                       |    |
| <b>2 Medienangriff</b> .....                                                               | 27 |
| 2.1 Die Wirkung von Medien auf Kunststoffe .....                                           | 27 |
| 2.1.1 Begriffserklärung: Medienangriff .....                                               | 27 |
| 2.1.2 Direkter und indirekter Medienangriff .....                                          | 28 |
| 2.1.3 Strahlungs- und stofflich-medialer Angriff .....                                     | 29 |
| 2.1.4 Chemischer und physikalischer Medienangriff .....                                    | 31 |
| 2.2 Voraussetzungen für einen Medienangriff .....                                          | 32 |

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3      | Der Schutz vor Medienangriff .....                                     | 33        |
| 2.4      | Die Schädigungsmechanismen .....                                       | 34        |
| 2.4.1    | Arten der Schädigungsmechanismen .....                                 | 34        |
| 2.4.2    | Der oxidative Abbau .....                                              | 35        |
| 2.4.3    | Schädigung durch Hydrolyse .....                                       | 36        |
| 2.4.4    | Schädigung durch Chemikalien .....                                     | 40        |
| <b>3</b> | <b>Spannungszustand .....</b>                                          | <b>43</b> |
| 3.1      | Die Ursache von Spannungen .....                                       | 43        |
| 3.1.1    | Krafteinwirkung auf eine Flüssigkeit .....                             | 43        |
| 3.1.2    | Krafteinwirkung auf einen Festkörper .....                             | 45        |
| 3.1.3    | Viskoses und elastisches Verformungsverhalten von Kunststoffen .....   | 46        |
| 3.2      | Spannungen am Bauteil .....                                            | 47        |
| 3.3      | Spannungen und Orientierungen .....                                    | 50        |
| 3.3.1    | Die Unterscheidung zwischen Spannungen und Orientierungen .....        | 50        |
| 3.3.2    | Orientierungen in Kunststoffprodukten .....                            | 52        |
| 3.3.2.1  | Voraussetzungen für Orientierungen .....                               | 52        |
| 3.3.2.2  | Orientierungen bei faserverstärkten Materialien .....                  | 53        |
| 3.3.2.3  | Molekülorientierungen .....                                            | 55        |
| 3.3.3    | Eigenspannungen .....                                                  | 56        |
| 3.4      | Die Bildung von Orientierungen und Eigenspannungen .....               | 58        |
| 3.4.1    | Unterschiede zwischen Spannungen und Orientierungen .....              | 58        |
| 3.5      | Eigenspannungen und Orientierungen beim Spritzgießen .....             | 60        |
| 3.5.1    | Orientierungen und Eigenspannungen am Spritzgussteil .....             | 60        |
| 3.5.2    | Die Ausbildung von Orientierungen .....                                | 61        |
| 3.5.3    | Eigenspannungen beim Spritzgießen .....                                | 62        |
| 3.5.3.1  | Ursachen der Eigenspannungen .....                                     | 62        |
| 3.5.3.2  | Prozessablauf beim Spritzgießen .....                                  | 63        |
| 3.5.3.3  | Die Entformung .....                                                   | 65        |
| 3.5.3.4  | Auswirkungen einer Schwindungsbehinderung auf<br>Eigenspannungen ..... | 67        |
| 3.5.3.5  | Eigenspannungen bei Montageprozessen .....                             | 68        |
| <b>4</b> | <b>Schadensfreie Verformung .....</b>                                  | <b>69</b> |
| 4.1      | Einordnung .....                                                       | 69        |
| 4.2      | Differential- und Integralbauweise .....                               | 70        |
| 4.2.1    | Unterscheidung der Kategorien .....                                    | 70        |
| 4.2.2    | Die Differentialbauweise .....                                         | 70        |
| 4.2.3    | Die Integralbauweise .....                                             | 71        |
| 4.2.4    | Die Mischbauweise .....                                                | 72        |
| 4.2.5    | Geeignete Bauweisen für Kunststoffprodukte .....                       | 73        |
| 4.3      | Das Verformungsverhalten der Werkstoffe .....                          | 74        |
| 4.3.1    | Begriffe zum Verformungsverhalten .....                                | 74        |
| 4.3.2    | Die Zugfestigkeit .....                                                | 75        |
| 4.3.3    | Die Steifigkeit eines Materials .....                                  | 75        |

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.4    | Die Dehnung .....                                                | 76        |
| 4.3.4.1  | Die Kritische Dehnung .....                                      | 76        |
| 4.3.4.2  | Die zulässige Dehnung .....                                      | 77        |
| 4.3.5    | Bauteilspezifische Minderung .....                               | 79        |
| 4.3.5.1  | Einflussfaktoren .....                                           | 79        |
| 4.3.5.2  | Vorgehensweise .....                                             | 79        |
| 4.3.5.3  | Anzahl der Lastwechsel .....                                     | 80        |
| 4.3.5.4  | Füll- und Verstärkungsstoffe .....                               | 81        |
| 4.3.5.5  | Starke Materialbelastung bei der Fertigung .....                 | 82        |
| 4.3.5.6  | Mehrachsige Spannungszustände .....                              | 82        |
| 4.3.5.7  | Beanspruchungsgeschwindigkeit .....                              | 83        |
| 4.3.5.8  | Die Wanddicke .....                                              | 83        |
| 4.3.5.9  | Berücksichtigung der Kerbwirkung .....                           | 83        |
| 4.4      | Starre und flexible Konstruktionen .....                         | 84        |
| <b>5</b> | <b>Entformbarkeit .....</b>                                      | <b>89</b> |
| 5.1      | Beschreibung der Situation .....                                 | 89        |
| 5.1.1    | Die Entwicklung von Werkzeugen .....                             | 89        |
| 5.1.2    | Stückzahlen .....                                                | 90        |
| 5.1.3    | Die Verwendung von Normalien im Werkzeugbau .....                | 91        |
| 5.2      | Teile aus der flachen Trennebene .....                           | 93        |
| 5.2.1    | Die Werkzeuganlage .....                                         | 93        |
| 5.2.2    | Auswerfen .....                                                  | 97        |
| 5.2.3    | Besonderheiten .....                                             | 99        |
| 5.3      | Teile aus Werkzeugen mit Trennungssprung .....                   | 100       |
| 5.3.1    | Die Werkzeuganlage .....                                         | 100       |
| 5.3.2    | Auswerfen .....                                                  | 102       |
| 5.3.3    | Besonderheiten .....                                             | 103       |
| 5.4      | Teile mit Durchbrüchen und Werkzeuge mit Blockierungen .....     | 104       |
| 5.4.1    | Die Werkzeuganlage .....                                         | 104       |
| 5.4.2    | Auswerfen .....                                                  | 106       |
| 5.4.3    | Besonderheiten .....                                             | 109       |
| 5.5      | Becherförmige Teile .....                                        | 111       |
| 5.5.1    | Die Werkzeuganlage .....                                         | 111       |
| 5.5.2    | Auswerfen .....                                                  | 112       |
| 5.5.3    | Besonderheiten .....                                             | 114       |
| 5.6      | Schieber- und Backenwerkzeuge mit zusätzlichen Trennebenen ..... | 119       |
| 5.6.1    | Der Werkzeugaufbau .....                                         | 119       |
| 5.6.2    | Auswerfen .....                                                  | 122       |
| 5.6.3    | Besonderheiten .....                                             | 122       |
| 5.7      | Ausdreh-Werkzeuge für innere Gewinde .....                       | 125       |
| 5.7.1    | Die Werkzeuganlage .....                                         | 125       |
| 5.7.2    | Auswerfen .....                                                  | 126       |
| 5.7.3    | Besonderheiten .....                                             | 127       |

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.8      | Werkzeuge mit inneren Schiebern und Einfallkernen                       | 129        |
| 5.8.1    | Das Werkzeugkonzept                                                     | 129        |
| 5.8.2    | Auswerfen                                                               | 131        |
| 5.8.3    | Besonderheiten                                                          | 131        |
| 5.9      | Teile mit extremen Hinterschneidungen                                   | 133        |
| 5.9.1    | Verfahrenstechnik und Werkzeugaufbau                                    | 133        |
| 5.9.2    | Auswerfen und Nachbearbeitung                                           | 136        |
| 5.9.3    | Besonderheiten                                                          | 137        |
| 5.10     | Teile mit Hinterschneidungen, die Zwangsentformung zulassen             | 138        |
| 5.10.1   | Der grundsätzliche Werkzeugaufbau                                       | 138        |
| 5.10.2   | Auswerfer                                                               | 140        |
| 5.10.3   | Besonderheiten                                                          | 140        |
| <b>6</b> | <b>Konstante Wanddicken</b>                                             | <b>143</b> |
| 6.1      | Wanddicken an einem Erzeugnis                                           | 143        |
| 6.1.1    | Wanddicken und Leichtbau                                                | 143        |
| 6.1.2    | Wanddicke und Verarbeitungsverfahren                                    | 144        |
| 6.2      | Grundlagen von technologischen Prozessen bei der Kunststoffverarbeitung | 146        |
| 6.2.1    | Einordnung                                                              | 146        |
| 6.2.2    | Betrachtungsweise                                                       | 146        |
| 6.2.3    | Erwärmen der Schmelze                                                   | 150        |
| 6.2.4    | Kompression zur Formgebung                                              | 150        |
| 6.2.5    | Abkühlung unter Druckabbau                                              | 151        |
| 6.2.6    | Isobare Abkühlung bei atmosphärischem Druck                             | 152        |
| 6.3      | Probleme, die durch Wanddickenunterschiede verursacht sind              | 153        |
| 6.4      | Das Kantenproblem bei kastenartigen Strukturen                          | 156        |
| <b>7</b> | <b>Geometrische Versteifung</b>                                         | <b>161</b> |
| 7.1      | Ausführungen einer geometrischen Versteifung                            | 161        |
| 7.1.1    | Erhöhung der Steifigkeit                                                | 161        |
| 7.1.2    | Varianten der geometrischen Versteifung                                 | 162        |
| 7.2      | Versteifung mit Rippen                                                  | 164        |
| 7.2.1    | Rippenversteifung an belasteten Flächen                                 | 164        |
| 7.2.2    | Anordnung der Rippen                                                    | 164        |
| 7.2.3    | Belastungsgerechte Anpassung der Rippen                                 | 166        |
| 7.2.4    | Anbindung der Rippen an die Grundstruktur                               | 168        |
| 7.2.5    | Werkzeugtechnische Umsetzung von Rippenstrukturen                       | 172        |
| 7.2.6    | Funktionale Einbindung von Rippen                                       | 175        |
| 7.3      | Versteifung mit Schalengeometrie                                        | 176        |
| 7.3.1    | Schalengeometrie als Art des fertigungsgerechten Konstruierens          | 176        |
| 7.3.2    | Zur konstruktiven Umsetzung                                             | 177        |
| 7.4      | Anwendung des Prinzips „Wellblech“                                      | 178        |
| 7.5      | Kombination der Möglichkeiten zur geometrischen Versteifung             | 179        |

|          |                                                                                          |     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>8</b> | <b>Konstruktive Duktilität</b>                                                           | 181 |
| 8.1      | Duktilität als Konstruktionsforderung                                                    | 181 |
| 8.2      | Rasthaken                                                                                | 184 |
| 8.2.1    | Vorteile von Rasthaken                                                                   | 184 |
| 8.2.2    | Montagestrategien                                                                        | 184 |
| 8.2.3    | Varianten der Rastverbindungen                                                           | 186 |
| 8.3      | Montagebruch an Rasthaken                                                                | 191 |
| 8.3.1    | Grundsätzliche Lösungsansätze                                                            | 191 |
| 8.3.2    | Technologische Maßnahmen gegen den Montagebruch von Rasthaken                            | 191 |
| 8.3.2.1  | Zur Vorgehensweise                                                                       | 191 |
| 8.3.2.2  | Eingangsgrößen für den Prozess                                                           | 192 |
| 8.3.2.3  | Betrachtung des Herstellungsprozesses für die Bauteile                                   | 193 |
| 8.3.2.4  | Betrachtung des Montageprozesses                                                         | 194 |
| 8.3.3    | Grundsätzliche konstruktive Möglichkeiten zur Vermeidung des Montagebruchs von Rasthaken | 194 |
| 8.3.4    | Beseitigung der Kerbwirkung                                                              | 195 |
| 8.3.5    | Vergrößerung der Biegelänge                                                              | 196 |
| 8.3.6    | Veränderungen am Querschnitt des Rasthakens                                              | 197 |
| 8.3.7    | Verminderung der Durchbiegung                                                            | 198 |
| 8.3.8    | Zusätzliche, alternative Verformungsmechanismen                                          | 199 |
| 8.3.9    | Alternatives Konstruktionsprinzip für die Rastverbindung                                 | 200 |
| 8.4      | Vermeidung einer unbeabsichtigten Demontage von Rastverbindungen                         | 201 |
| 8.5      | Weitere duktile Konstruktionselemente                                                    | 203 |
| 8.6      | Möglichkeiten zur Verbesserung der Duktilität                                            | 204 |
| 8.6.1    | Überblick                                                                                | 204 |
| 8.6.2    | Anspritzen einer weichen Komponente                                                      | 204 |
| 8.6.3    | Schlitze an becherartigen Formteilen                                                     | 205 |
| 8.6.4    | Faltungen an Schalenelementen                                                            | 206 |
| 8.7      | Zur Modifikationen von Gehäusen                                                          | 207 |
| <b>9</b> | <b>Veränderliche Geometrie</b>                                                           | 211 |
| 9.1      | Begriffsbestimmung                                                                       | 211 |
| 9.2      | Veränderliche Geometrie als Nutzungsmerkmal bei Kunststoffprodukten                      | 214 |
| 9.2.1    | Mögliche Mechanismen                                                                     | 214 |
| 9.2.2    | Temperatureinfluss                                                                       | 215 |
| 9.2.3    | Medienaufnahme und Medienabgabe                                                          | 216 |
| 9.2.4    | Freisetzen von Spannungen                                                                | 217 |
| 9.2.5    | Verformungsverhalten                                                                     | 217 |
| 9.3      | Veränderliche Geometrie für unterschiedliche Abschnitte des Produktlebenszyklus          | 218 |
| 9.3.1    | Motivation                                                                               | 218 |
| 9.3.2    | Allmähliche Veränderung der Geometrie im Herstellungsprozess und beim Gebrauch           | 220 |
| 9.3.3    | Allmähliche anwendungsbedingte Veränderung der Geometrie                                 | 222 |

|                    |                                                                                               |            |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9.4</b>         | <b>Diskontinuierliche, schnelle Veränderung der Geometrie im Herstellungsprozess</b>          | <b>223</b> |
| 9.4.1              | Begriffserklärung                                                                             | 223        |
| 9.4.2              | Spannvorrichtungen                                                                            | 224        |
| 9.4.3              | Vorrichtungen zum nachträglichen Kalibrieren                                                  | 228        |
| 9.4.4              | Nachträgliche Bearbeitung eines Bauteils                                                      | 230        |
| 9.4.5              | Einspannen des Bauteils für die Montage                                                       | 231        |
| 9.4.6              | Demontage von Baugruppen vor dem Einsatz                                                      | 233        |
| 9.4.7              | Umbau von Baugruppen nach der ersten Nutzungsphase,<br>um eine weitere Nutzung zu ermöglichen | 234        |
| 9.4.8              | Rückbau von Baugruppen nach der Nutzung                                                       | 234        |
| <b>9.5</b>         | <b>Funktionsbedingte veränderliche Geometrie</b>                                              | <b>238</b> |
| 9.5.1              | Erprobte Einsatzgebiete                                                                       | 238        |
| 9.5.2              | Gelenklose Anwendungen, die Duktilität nutzen                                                 | 239        |
| 9.5.3              | Lokale Gelenke                                                                                | 241        |
| 9.5.4              | Faltbare Anwendungen                                                                          | 244        |
| 9.5.5              | Lokale Flexibilität und Hochelastische Anwendungen                                            | 246        |
|                    | 9.5.5.1 Realisierung mit einer weichen Materialkomponente                                     | 246        |
|                    | 9.5.5.2 Realisierung mit konstruktiver Duktilität                                             | 248        |
| 9.5.6              | Reversibles Beulen                                                                            | 249        |
| <b>10</b>          | <b>Funktionsintegration</b>                                                                   | <b>253</b> |
| <b>10.1</b>        | <b>Der Begriff Funktionsintegration</b>                                                       | <b>253</b> |
| <b>10.2</b>        | <b>Die konstruktive Funktionsintegration</b>                                                  | <b>257</b> |
| 10.2.1             | Das Wesen der konstruktiven Funktionsintegration                                              | 257        |
| 10.2.2             | Das Prinzip „Funktionelle Mehrfachnutzung“                                                    | 259        |
| 10.2.3             | Das Prinzip „zusätzliche Geometrie“ zur Gewährleistung einer<br>weiteren Funktion             | 260        |
| 10.2.4             | Vergleich der beiden Prinzipien                                                               | 261        |
| 10.2.5             | Beispiele für eine konstruktive Funktionsintegration                                          | 263        |
| <b>10.3</b>        | <b>Die technologische Funktionsintegration</b>                                                | <b>265</b> |
| 10.3.1             | Optimierung der technologischen Abläufe                                                       | 265        |
| 10.3.2             | Funktionsintegration durch Anpassung technologischer Abläufe                                  | 266        |
| <b>10.4</b>        | <b>Sonderverfahren als Mittel der technologischen Funktionsintegration</b>                    | <b>270</b> |
| 10.4.1             | Übersicht                                                                                     | 270        |
| 10.4.2             | Die Sondertechnologie „Mehrkomponentenspritzgießen“                                           | 271        |
| 10.4.3             | Einige Gestaltungsregeln zum Mehrkomponentenspritzgießen                                      | 272        |
| 10.4.4             | Sondertechnologien als Hinterspritzverfahren                                                  | 275        |
| <b>11</b>          | <b>Checkliste zur Konstruktion von Kunststoffteilen</b>                                       | <b>281</b> |
| <b>Autor</b>       |                                                                                               | <b>287</b> |
| Prof. Torsten Kies |                                                                                               | 287        |
| <b>Index</b>       |                                                                                               | <b>289</b> |