

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Anwendungen der Kunststoffe .....	1
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe .....	7
1.3 Vergleich von Kunststoffwerkstoffen und metallischen Werkstoffen .....	11
1.3.1 Zeitliche Zusammenhänge .....	12
1.3.2 Werkstoffverhalten .....	13
1.3.3 (Teil-)Kristallinität .....	15
1.3.4 Glasübergang .....	16
1.3.5 Entropieelastizität .....	17
1.3.6 Kräfte in und zwischen Molekülen .....	17
1.3.7 Zeitabhängiges Verhalten .....	18
1.3.8 Rohstoffverbrauch .....	19
1.3.9 Energiebedarf .....	23
1.3.10 Preise .....	25
<b>2 Polymere</b> .....	<b>33</b>
2.1 Stoffe, Verbindungen, Atome und Elemente .....	33
2.2 Aufbau und Struktur von Polymeren .....	37
2.2.1 Monomer, Polymer und lineare Kette .....	37
2.2.2 Konstitution, Konfiguration und Konformation .....	43
2.2.3 Co- und Terpolymere .....	49
2.2.4 Verzweigungen .....	51
2.2.5 Chemische und physikalische Vernetzung .....	53
2.2.6 Klassifizierung der Polymere nach ihrer Struktur .....	57
2.2.7 Klassifizierung der Thermoplaste nach Kennwerten und Produktionsmenge .....	58
2.2.8 Klassifizierung der Polymere nach ihrer Rohstoffbasis ..	59

2.3	Molmasse .....	64
2.4	Haupt- und Nebenvalenzbindungen .....	71
2.4.1	Hauptvalenzbindung .....	72
2.4.2	Nebenvalenzbindung .....	75
2.4.2.1	Polarität .....	76
2.4.2.2	Dipol-Dipol-Bindung .....	80
2.4.2.3	Wasserstoffbrückenbindung .....	81
2.4.2.4	Induktionskräfte .....	82
2.4.2.5	Dispersionskräfte .....	82
2.5	Zustandsbereiche und Zustandsänderungen .....	83
2.5.1	Amorpher Zustand .....	83
2.5.2	Bewegung von Polymeren im amorphen Zustand .....	86
2.5.3	Glasübergang .....	89
2.5.4	Teilkristalliner Zustand .....	96
2.5.5	Schmelzen von Kristallen .....	107
2.5.6	Kristallisieren .....	110
2.6	Innere und äußere Weichmachung .....	118
2.6.1	Äußere Weichmachung .....	118
2.6.2	Innere Weichmachung .....	119
<b>3</b>	<b>Kunststoffe .....</b>	<b>123</b>
3.1	Additive .....	123
3.1.1	Antioxidanzien .....	125
3.1.2	UV-Stabilisatoren .....	129
3.1.3	Flammschutzmittel .....	132
3.1.4	Weichmacher .....	136
3.1.5	Farbmittel .....	138
3.2	Füllstoffe .....	144
3.2.1	Kreide .....	154
3.2.2	Talkum .....	156
3.2.3	Glaskugeln .....	157
3.3	Verstärkungsstoffe .....	157
3.3.1	Glasfasern .....	164
3.3.2	Aramidfasern .....	166
3.3.3	Kohlenstofffasern .....	168
3.3.4	Fasern aus nachwachsenden Rohstoffen .....	171
3.3.5	Verstärkung durch Fasern .....	176
3.4	Kunststoffwerkstoffe .....	186
3.4.1	Bezeichnung der Kunststoffe .....	186
3.4.2	Anwendungsbereiche für Kunststoffe .....	188

3.4.3	Normative Anforderungen an Kunststoffwerkstoffe . . . .	191
3.4.4	Datenbanken für Kunststoffe . . . . .	193
<b>4</b>	<b>Verarbeitung von Kunststoffen . . . . .</b>	<b>197</b>
4.1	Spritzgießen . . . . .	197
4.2	Extrudieren . . . . .	200
4.3	Formpressen . . . . .	202
4.4	Entstehen von Orientierungen beim Spritzgießen . . . . .	204
4.5	Verarbeitungstypische Morphologien . . . . .	209
<b>5</b>	<b>Nachhaltigkeit von Kunststoffen . . . . .</b>	<b>215</b>
5.1	Kunststoffe in der Umwelt . . . . .	215
5.1.1	Mikroplastik . . . . .	216
5.1.2	Marine Litter . . . . .	219
5.2	Entwicklung der Nachhaltigkeit . . . . .	223
5.3	Gesetzliche Vorgaben . . . . .	226
5.3.1	Vermeidung . . . . .	229
5.3.2	Wiederverwendung . . . . .	231
5.3.3	Recycling . . . . .	232
5.3.4	Sonstige Verwertung . . . . .	232
5.3.5	Beseitigung . . . . .	232
5.4	Abfallmengen und ihre Entwicklung . . . . .	233
5.5	Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland . . . . .	234
5.6	Sammlung von Kunststoffabfällen . . . . .	239
5.7	Recycling . . . . .	242
5.7.1	Anfänge des Kunststoffrecyclings in Deutschland . . . . .	242
5.7.2	Kunststoffrecycling in der Europäischen Union . . . . .	244
5.7.3	Werkstoffabhängige Arten des Recyclings . . . . .	244
5.7.4	Herausforderungen beim Recycling von Kunststoffen . .	246
5.7.5	Sortierung . . . . .	247
5.7.6	Werkstoffliches Recycling von Kunststoffabfällen . . . . .	251
5.7.7	Rohstoffliches Recycling von Kunststoffabfällen . . . . .	257
5.7.8	Design für Recycling . . . . .	259
5.8	Ökobilanz, Life Cycle Assessment (LCA) . . . . .	262
5.8.1	Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz . . . . .	262
5.8.2	Normen zur Ökobilanz . . . . .	267
5.8.3	Datenquellen für Ökobilanzen . . . . .	269
5.9	Beitrag von Kunststoffen zu einer nachhaltigen Entwicklung . . .	269

5.9.1	Verringerung von Lebensmittelabfällen durch Kunststoffverpackungen .....	271
5.9.2	Weniger Treibstoffverbrauch durch Leichtbau mit Kunststoffen .....	276
5.9.3	Energieeinsparungen durch Kunststoffdämmstoffe .....	277
5.9.4	Wasser- und Energieeinsparung in der Landwirtschaft ..	279
5.9.5	Schutzmasken aus Kunststoffen .....	281
5.9.6	Kunststoffe als Enabler für die Nutzung regenerativer Energien .....	283
5.10	Entwicklungsfelder für nachhaltige Kunststoffe .....	287
5.10.1	Rohstoffbasis ändern .....	287
5.10.2	Stoffkreisläufe schließen .....	288
5.10.3	Nutzungsphase verlängern .....	289
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Normung .....</b>	<b>297</b>
6.1	Entwicklung und Nutzen der Normung .....	297
6.2	Normung in der Kunststofftechnik .....	299
<b>7</b>	<b>Mechanisches Verhalten fester Kunststoffe .....</b>	<b>303</b>
7.1	Methoden der Werkstoffprüfung .....	303
7.1.1	Zusammenhang zwischen Normen .....	303
7.1.2	Normalklimate für Konditionierung und Prüfung .....	305
7.1.3	Probekörper .....	308
7.1.4	Bestimmung der Zugeigenschaften .....	313
7.1.5	Bestimmung der Biegeeigenschaften .....	319
7.1.6	Bestimmung der Härte .....	327
7.1.6.1	Grundlagen der Härtemessung .....	327
7.1.6.2	Kugeleindruckhärte .....	330
7.1.6.3	Shore-Härte .....	331
7.1.7	Bestimmung des Kriechverhaltens .....	333
7.1.8	Bestimmung der Schlagbiegeeigenschaften .....	337
7.2	Verhalten der Kunststoffe .....	343
7.2.1	Verhalten im Zugversuch .....	343
7.2.2	Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens	345
7.2.3	Zeitabhängigkeit des mechanischen Verhaltens .....	350
7.2.4	Feuchteabhängigkeit des mechanischen Verhaltens ....	355
7.2.5	Der Übergang vom linearen zum nicht-linearen Verhalten .....	358
7.3	Mechanische Werkstoffmodelle .....	361
7.3.1	Begriffe und Konzepte der Mechanik .....	362

7.3.1.1	Spannungen .....	364
7.3.1.2	Verzerrungen .....	364
7.3.1.3	Annahme kleiner Deformationen .....	365
7.3.1.4	Stoffgesetz .....	366
7.3.1.5	Linearität .....	366
7.3.1.6	Annahmen in der Elastostatik .....	367
7.3.1.7	Begriffe zur Beschreibung des Materialverhaltens .....	368
7.3.2	Phänomenologische Beschreibung des Materialverhaltens .....	370
7.3.2.1	Ideal linear-elastisches Verhalten .....	371
7.3.2.2	Ideal linear-viskoses Verhalten .....	373
7.3.2.3	Ideal plastisches Verhalten .....	375
7.3.2.4	Vergleich viskoser und plastischer Deformation .....	378
7.3.2.5	Maxwell-Modell zur Beschreibung der Relaxation .....	378
7.3.2.6	Kelvin-Voigt-Modell zur Beschreibung der Retardation .....	381
7.3.2.7	Burgers- oder Vier-Parameter-Modell .....	382
7.3.3	Molekulare Begründung der Elastizität in Kunststoffen	384
7.3.3.1	Energieelastizität .....	384
7.3.3.2	Entropieelastizität .....	385
7.3.4	Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip .....	386
7.3.5	Einfluss verarbeitungsbedingter Eigenspannungen auf mechanische Kennwerte .....	391
<b>A Kurzzeichen für Kunststoffe .....</b>		<b>395</b>
<b>Index .....</b>		<b>401</b>