

# Inhalt

<b>Vorwort zur 7. Auflage</b> .....	<b>V</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe</b> .....	<b>1</b>
1.1 Geschichte der Kunststoffe .....	2
1.2 Die Eigenschaften von Kunststoffen .....	5
1.3 Einsatzgebiete von Kunststoffen .....	10
1.4 Die Kunststoffindustrie .....	11
1.5 Kunststoffe im Kreislauf .....	13
1.5.1 Kreislaufwirtschaft .....	14
1.5.2 Kunststoffverwertung .....	15
1.5.3 Biokunststoffe und alternative Rohstoffe .....	22
1.6 Kunststofftechnik .....	24
<b>2 Bildung von Makromolekülen und Polymeren</b> .....	<b>27</b>
2.1 Begriffsdefinitionen: Monomer, Makromolekül, Polymer, Kunststoff .....	27
2.2 Ausgangsstoffe zur Herstellung von Kunststoffen .....	31
2.3 Aufbau und Eigenschaften von Makromolekülen .....	35
2.3.1 Lineare Makromoleküle .....	35
2.3.2 Verzweigte Makromoleküle .....	35
2.3.3 Vernetzte Makromoleküle (Duroplaste, Elastomere) .....	36
2.4 Bildung und Herstellung von Polymeren .....	37
2.4.1 Vom Atom zum Molekül über kovalente Bindungen .....	37
2.4.2 Hauptvalenzbindungen .....	40

2.4.2.1	Kovalente Atombindung .....	40
2.4.2.2	Ionenbindung .....	42
2.4.3	Polymerisation über ungesättigte Bindungen (Kettenwachstumsreaktion) .....	43
2.4.3.1	Radikalische Polymerisation .....	43
2.4.3.2	Anionische Polymerisation .....	47
2.4.3.3	Kationische Polymerisation .....	48
2.4.3.4	Koordinative Polymerisation .....	50
2.4.4	Polyaddition und Polykondensation über reaktive Endgruppen (Stufenwachstumsreaktion) .....	50
2.4.5	Vernetzung .....	54
2.4.5.1	Vernetzungen über ungesättigte Bindungen .....	54
2.4.5.2	Vernetzung über reaktive Gruppen .....	54
2.4.5.3	Vernetzung über Strahlung oder Peroxide .....	56
2.4.6	Biopolymere .....	56
2.4.6.1	Produkte .....	57
2.4.6.2	Bandbreite der Biopolymere .....	57
2.4.6.3	Biopolymere natürlichen Ursprungs .....	58
2.4.7	Molmasse und Molmassenverteilung .....	60
2.4.7.1	Messung von Molmassen und Molmassen- verteilungen .....	65
2.4.8	Relevante technische Herstellungsverfahren .....	67
<b>3</b>	<b>Polymere Strukturen .....</b>	<b>73</b>
3.1	Wechselwirkungen von Makromolekülen .....	73
3.1.1	Dispersionskräfte .....	74
3.1.2	Dipolkräfte .....	75
3.1.3	Wasserstoffbrückenbindungen .....	76
3.1.4	Vergleich der Nebervalenzkräfte .....	77
3.2	Primärstruktur und Eigenschaften .....	78
3.2.1	Molekülordnung .....	78
3.2.2	Sterische Ordnung .....	79
3.2.3	Taktizität .....	79
3.2.4	Konfiguration der Doppelbindungen in der Kette .....	81
3.2.5	Verzweigungen .....	82

3.3	Sekundärstruktur und Eigenschaften .....	84
3.4	Supramolekulare Strukturen .....	90
3.4.1	Vernetzungen .....	90
3.4.2	Kristallisation .....	92
3.5	Besondere polymere Strukturen .....	93
3.5.1	Flüssigkristalline Kunststoffe (liquid crystalline polymers, LCP) .....	93
3.5.2	Polysalze (intrinsisch leitfähige Polymere) .....	94
3.6	Modifizierung der Eigenschaften .....	95
3.6.1	Copolymere .....	95
3.6.1.1	Eigenschaften ausgewählter Copolymere .....	97
3.6.1.2	Copolymere für die industrielle Anwendung .....	101
3.6.2	Polymerblends .....	102
3.6.2.1	Thermodynamisches Kriterium für verträgliche Polymerblends .....	103
3.6.2.2	Homogene Blends aus verträglichen Polymeren ....	106
3.6.2.3	Heterogene Blends aus begrenzt verträglichen Polymeren .....	106
3.6.2.4	Heterogene Blends aus Mehrphasengemischen ....	107
3.6.3	Modifizierungen durch Füllstoffe .....	109
3.6.3.1	Verarbeitungshilfsmittel .....	109
3.6.3.2	Gebrauchsfähigkeitsverlängernde Zuschlagstoffe ...	111
3.6.3.3	Flammschutzmittel .....	111
3.6.3.4	Färbende Zuschlagstoffe .....	111
3.6.3.5	Festigkeitserhöhende Zuschlagstoffe .....	111
3.6.3.6	Steifigkeitserhöhende Zuschlagstoffe .....	112
3.6.3.7	Festigkeit und Steifigkeit herabsetzende Zuschlagstoffe .....	113
3.6.3.8	Treibmittel .....	113
3.6.3.9	Nanofüllstoffe .....	114

<b>4</b>	<b>Verhalten im Schmelzezustand</b>	<b>119</b>
4.1	Viskose Kunststoffschmelzen unter stationärer Scherströmung	122
4.1.1	Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit	124
4.1.1.1	Mathematische Modellierung der Schergeschwindigkeitsabhängigkeit	126
4.1.2	Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Druck	130
4.1.2.1	Temperaturabhängigkeit	130
4.1.3	Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt	136
4.1.4	Druckströmungen in einfachen Fließkanälen	138
4.1.5	Erwärmung infolge von Scherung	141
4.1.6	Schergeschwindigkeitsbereiche in Verarbeitungsprozessen	142
4.2	Überlagerung von Scher- und Dehnströmung	143
4.3	Viskoelastische Kunststoffschmelzen	146
4.3.1	Viskoelastische Eigenschaften und ihre Beschreibung	148
4.3.2	Normalspannungen in der Scherströmung	149
4.3.3	Die Deborah-Zahl	150
4.3.4	Bedeutung für die Verarbeitung	151
4.4	Polymere mit zeitlich veränderlichen Fließeigenschaften	155
4.4.1	Vernetzende Systeme	155
4.5	Messtechnik	158
4.5.1	Kapillarrheometer	160
4.5.2	MFR-Messgerät (Schmelze-Massefließrate)	162
4.5.3	Rotationsrheometer	164
4.5.3.1	Bauarten von Rotationsrheometern	165
4.5.3.2	Grundversuche mit Rotationsrheometern	166
4.5.3.3	Anwendungsbeispiel für den Schwingversuch	168
4.5.3.4	Viskositätsmessung mittels oszillierender Scherdeformation oder in stationärer Strömung	170
4.5.4	Bestimmung der Dehnviskosität	172
4.5.4.1	Messtechnik für uniaxiale Dehnung	172
4.5.4.2	Messtechnik für biaxiale Dehnung	174

<b>5</b>	<b>Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur</b>	<b>181</b>
5.1	Einleitung	181
5.2	Erstarrung amorpher Thermoplaste	184
5.2.1	Molekülorientierungen	185
5.2.2	Berechnung der Orientierung	192
5.3	Erstarrung teilkristalliner Thermoplaste	193
5.3.1	Kristallstrukturen	195
5.3.2	Beschreibung des Kristallisationsprozesses	198
5.3.3	Berechnung des Keimbildungsprozesses	203
5.3.3.1	Ruhender Anteil der Gibbsenergie	207
5.3.3.2	Strömungsanteil der Gibbsenergie	209
5.3.4	Berechnung des Kristallwachstums	210
5.3.5	Berechnung des relativen Kristallisationsgrades	212
5.4	Gefügebeobachtungen	213
5.4.1	Lichtmikroskopie	214
5.4.2	Elektronenmikroskopie	220
5.4.3	Zerstörungsfreie Analyse	225
<b>6</b>	<b>Mechanisches Verhalten von Kunststoffen</b>	<b>227</b>
6.1	Beschreibung der mechanischen Spannung – elastische Konstanten und Kennwerte	228
6.1.1	Der Elastizitätsmodul (Dehnungsbeanspruchung)	228
6.1.2	Die Querkontraktion	229
6.1.3	Der Schubmodul (Scherungsbeanspruchung)	231
6.1.4	Der Kompressionsmodul (Kompressionsbeanspruchung)	233
6.1.5	Korrelationen der Moduln und Spannungstensor	233
6.2	Die Zustandsbereiche der Kunststoffe	235
6.2.1	Amorphe Thermoplaste	235
6.2.2	Teilkristalline Thermoplaste	236
6.2.3	Vernetzte Polymere (Duroplaste und Elastomere)	238
6.3	Das Verformungsverhalten fester Kunststoffe	240
6.3.1	Viskoelastische Eigenschaften und ihre Beschreibung	240

6.3.1.1	Mechanische Ersatzmodelle für die lineare Viskoelastizität .....	245
6.3.1.2	Modellierung der nichtlinearen Viskoelastizität ....	253
6.4	Richtungsabhängige Werkstoffeigenschaften .....	257
6.4.1	Orientierung der Makromoleküle .....	257
6.4.2	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe .....	260
6.5	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Kunststoffe .....	263
6.5.1	Die dynamisch-mechanische Analyse .....	263
6.5.2	Der Zugversuch .....	265
6.5.3	Der dehnungsgeregelte Zugversuch .....	266
6.5.4	Dehnungsmessung .....	268
6.5.5	Der Zeitstandzugversuch (Kriechversuch) .....	269
6.5.6	Der Relaxationsversuch .....	271
6.6	Zeitraffende Prüfung .....	274
<b>7</b>	<b>Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffprodukten ....</b>	<b>281</b>
7.1	Das mikromechanische Verhalten von Kunststoffen unter Zugbeanspruchung .....	282
7.1.1	Kunststoffe im Dehnbereich bis zur kritischen Dehnung .....	282
7.1.1.1	Erklärungsansätze für die Bildung von Crazes .....	286
7.1.2	Kunststoffe im Dehnbereich oberhalb der kritischen Dehnung bis zum Bruch .....	289
7.1.3	Veränderung des mikromechanischen Verhaltens von Kunststoffen durch Additive und Füllstoffe .....	291
7.1.3.1	Niedermolekulare Additive .....	291
7.1.3.2	Weiche Füllstoffe .....	291
7.1.3.3	Harte Füllstoffe .....	293
7.2	Auslegung und Bemessung von Bauteilen aus unverstärkten Kunststoffen unter statischer Last .....	293
7.2.1	Grundsätzliches Vorgehen .....	294
7.2.2	Werkstoffabminderungsfaktoren .....	296
7.2.3	Dimensionierungskennwerte .....	300
7.2.4	Sicherheitsbeiwerte .....	301
7.2.5	Spannungsbezogene Vergleichshypothesen .....	302

7.3	Auslegung und Bemessung von Bauteilen aus unverstärkten Kunststoffen unter dynamischer Last .....	309
7.3.1	Zyklische Belastung .....	309
7.3.2	Stoßartige Belastung .....	315
7.4	Verhalten von Kunststoffprodukten bei Druckbelastung (Schalen, Platten, Stäbe) .....	323
7.4.1	Mathematische Herleitung der kritischen Stauchung .....	325
7.4.2	Schlankheitsgrade verschiedener Standardlastfälle .....	328
7.5	Die Tragfähigkeit von faserverstärkten Kunststoffen .....	330
7.5.1	Faserarten .....	331
7.5.2	Aufmachung von Verstärkungsfasern .....	333
7.5.3	Eigenschaften des Verbundes aus Matrix und Fasern .....	335
7.5.4	Tragfähigkeit kurzfaserverstärkter Kunststoffe .....	342
7.6	Reibung und Verschleiß .....	344
7.6.1	Reibung .....	344
7.6.2	Verschleiß .....	352
<b>8</b>	<b>Thermische Eigenschaften und Analyse .....</b>	<b>359</b>
8.1	Thermische Eigenschaften .....	359
8.1.1	Einsatztemperatur und Wärmeformbeständigkeit .....	360
8.1.2	Enthalpie und Wärmekapazität .....	361
8.1.3	Wärmeausdehnung .....	364
8.1.4	Wärme- und Temperaturleitfähigkeit .....	367
8.1.5	Wärmeeindringzahl .....	376
8.2	Thermische Analyse .....	377
8.2.1	Messung der Wärmeformbeständigkeit .....	378
8.2.2	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) .....	381
8.2.3	Thermomechanische Analyse (TMA) .....	389
8.2.4	Messung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit .....	392
8.2.5	Thermogravimetrische Analyse (TGA) .....	396

<b>9</b>	<b>Elektrische Eigenschaften</b>	<b>401</b>
9.1	Das elektrische Isolationsverhalten	402
9.1.1	Der elektrische Durchgangswiderstand	402
9.1.2	Der elektrische Oberflächenwiderstand	404
9.1.3	Einfluss langzeitiger elektrischer Beanspruchung	406
9.2	Kunststoffe in elektrischen Feldern	408
9.2.1	Dielektrisches Verhalten	408
9.2.1.1	Die relative Permittivität $\epsilon_r$	408
9.2.1.2	Dielektrische Verluste	411
9.3	Weitere elektrische Eigenschaften von Kunststoffen	414
9.3.1	Elektrostatische Aufladung	414
9.3.2	Schirmdämpfung (engl.: Electro-Magnetic Interference (EMI))	415
9.3.3	Polymere mit speziellen elektrischen Eigenschaften	416
9.3.3.1	Intrinsisch leitfähige Polymere	416
9.3.3.2	Elektrete	419
9.3.3.3	Elektrooptische Polymere (OLED)	420
9.3.3.4	Elektorrheologische Flüssigkeiten	420
9.4	Magnetische Eigenschaften	422
9.4.1	Magnetisierbarkeit	423
9.4.2	Magnetische Resonanz	423
9.5	Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften	425
9.5.1	Bestimmung des Durchgangs- und Oberflächenwiderstandes	425
9.5.2	Bestimmung der Durchschlag- und Kriechstromfestigkeit	427
9.5.3	Bestimmung des dielektrischen Verhaltens	429
9.5.4	Bestimmung der elektrostatischen Aufladung	430
<b>10</b>	<b>Optische Eigenschaften</b>	<b>433</b>
10.1	Die Grundgesetzmäßigkeiten	433
10.1.1	Brechzahl	434
10.1.2	Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl (Dispersion des Lichts)	436
10.1.3	Der imaginäre Teil der Brechzahl	439
10.1.4	Die Totalreflexion	444
10.1.5	Doppelbrechung	445

10.2	Farbe, Glanz und Trübung .....	447
10.3	Einfärben von Kunststoffen .....	450
10.4	Die Anwendung der Infrarotstrahlung in der Kunststoffindustrie .....	455
10.4.1	Aufheizung durch Infrarotstrahlung .....	455
10.4.2	Kunststoffschweißen mittels Infrarotstrahlung .....	457
10.4.3	Infrarotspektroskopie .....	458
10.4.4	Berührungslose Temperaturmessung von Kunststoffoberflächen .....	461
10.5	Lichtstreuung in Mehrphasenkunststoffen .....	462
<b>11</b>	<b>Akustische Eigenschaften .....</b>	<b>465</b>
11.1	Grundlagen der Akustik .....	466
11.2	Schallausbreitung und -übertragung in polymeren Werkstoffen .....	471
11.3	Dämmung und Dämpfung zur Reduktion von Vibration und Lärm .....	476
11.4	Experimentelle und numerische Methoden der technischen Akustik ..	479
11.4.1	Messung akustischer Eigenschaften .....	479
11.4.2	Numerische Methoden zur Beschreibung akustischer Eigenschaften .....	482
<b>12</b>	<b>Stofftransportvorgänge .....</b>	<b>485</b>
12.1	Physikalische Beschreibung .....	487
12.1.1	Adsorption .....	488
12.1.2	Absorption .....	488
12.1.3	Diffusion .....	489
12.1.4	Desorption .....	490
12.1.5	Gesamter Permeationsvorgang .....	490
12.2	Temperaturabhängigkeit des Stofftransports .....	492
12.3	Permeationsbestimmende Eigenschaften der Polymere .....	495
12.3.1	Elastomere .....	496
12.3.2	Duroplaste .....	496
12.3.3	Thermoplaste .....	497
12.3.3.1	Kristallinität .....	497
12.3.3.2	Orientierung der Polymerketten .....	498
12.4	Abschätzung permeationsbestimmender Koeffizienten .....	499

12.4.1	Löslichkeitskoeffizient .....	499
12.4.2	Diffusionskoeffizient .....	500
12.5	Permeation durch Kunststoffe .....	501
12.5.1	Sorption und Diffusion von Wasser durch Kunststoffe .....	503
12.6	Maßnahmen zur Permeationsminderung .....	504
12.6.1	Mehrschichtige Verbundsysteme .....	505
12.6.2	Kunststofffolien .....	506
12.6.3	Kunststoff-Hohlkörper .....	507
12.7	Verfahren zur Messung von Permeationsgrößen .....	510
12.7.1	Volumetrisches Verfahren nach DIN 53380-1 Teil 1 .....	511
12.7.2	Manometrisches Verfahren nach DIN 53380-2 Teil 2 .....	511
12.7.3	Gravimetrisches Verfahren .....	512
12.7.4	Massenspektroskopisches Verfahren .....	512
12.7.5	Gaschromatografisches Verfahren .....	513
12.7.6	O <sub>2</sub> -spezifisches Trägergasverfahren nach DIN 53380-3 Teil 3 ..	513
12.7.7	O <sub>2</sub> -Fluoreszenzverfahren .....	515
12.7.8	CO <sub>2</sub> -spezifisches Infrarotabsorptionsverfahren nach DIN 53380-4 Teil 4 .....	515
<b>13</b>	<b>Die Alterung von Kunststoffen .....</b>	<b>519</b>
13.1	Alterungserscheinungen an Kunststoffen .....	519
13.2	Die Bandbreite des Begriffs „Alterung“ .....	521
13.2.1	Innere und äußere Ursachen der Alterung .....	522
13.2.2	Kunststoffalterung durch die Beanspruchung von außen .....	523
13.2.3	Die Überlagerung von Beanspruchungen: Lastkollektive .....	525
13.3	Mechanismen gängiger Alterungsprozesse .....	527
13.3.1	Die (thermo-)oxidative Alterung .....	527
13.3.2	Das strahleninduzierte Alterungsverhalten .....	531
13.3.3	Die hydrolytische Zersetzung .....	532
13.3.4	Die Entstehung von Spannungsrissen .....	537
13.4	Abhilfe- bzw. Vorbeugemaßnahmen zum Entschleunigen von Alterungsprozessen .....	541
13.4.1	Antioxidantien .....	542
13.4.2	Lichtschutzmittel .....	544

13.4.3 Metalldesaktivatoren .....	545
13.4.4 Biostabilisatoren .....	546
13.5 Beabsichtigte Alterungsvorgänge .....	546
13.5.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe .....	547
13.5.2 Resorbierbare Kunststoffe in der Medizintechnik .....	548
13.6 Beschleunigte Alterung zur Vorhersage des Langzeitverhaltens .....	550
13.7 Biopolymere fossilen Ursprungs mit der Eigenschaft biologischer Abbaubarkeit .....	553
13.7.1 Polyester .....	553
13.7.2 Polyesteramide .....	554
<b>14 Schadensanalyse an Kunststoffprodukten .....</b>	<b>557</b>
14.1 Definition der Begriffe Fehler und Schaden .....	559
14.2 Durchführung von Schadensanalysen .....	560
14.2.1 Erfassung und Dokumentation des Schadensbildes .....	561
14.2.2 Erfassung des Schadensumfeldes .....	562
14.2.3 Entwicklung von Schadensthesen .....	566
14.2.4 Festlegung des Prüfplans .....	567
14.2.5 Durchführung instrumenteller Analysen .....	568
14.2.6 Benennung von Einflüssen, Ursachen und Abhilfemaßnahmen .....	569
14.2.7 Praxis der Schadensanalyse .....	569
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>587</b>