

# Inhalt

1	Entwicklung und historische Bedeutung der Kunststoffe . . . . .	1
1.1	Historie . . . . .	1
1.2	Anwendung der Kunststoffe . . . . .	7
1.2.1	Strukturpolymere . . . . .	7
1.2.2	Kunststoffe mit besonderen Eigenschaften (Funktionspolymere) . . . . .	9
2	Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen kurz gefasst . . . . .	11
2.1	Hervorstechende Eigenschaften der Kunststoffe im Vergleich mit anderen Werkstoffen . . . . .	11
2.1.1	Kunststoffe sind leicht . . . . .	11
2.1.2	Kunststoffe sind flexibel . . . . .	12
2.1.3	Kunststoffe haben eine niedrige Verarbeitungs-(Urform-)Temperatur und ihre Schmelzen sind oft zähflüssig . . . . .	12
2.1.4	Kunststoffe haben niedrige Leitfähigkeiten . . . . .	14
2.1.5	Kunststoffe sind teilweise transparent . . . . .	14
2.1.6	Kunststoffe haben eine hohe chemische Beständigkeit . . . . .	14
2.1.7	Kunststoffe sind durchlässig (Permeation, Diffusion) . . . . .	14
2.1.8	Kunststoffe lassen sich mit Hilfe unterschiedlicher und vielseitiger Methoden wieder verwenden bzw. verwerten (Recycling) . . . . .	15
2.2	Bezeichnung der Kunststoffe . . . . .	16
2.3	Funktionspolymere . . . . .	17
2.3.1	Allgemeines . . . . .	17
2.3.2	Schaltbare Polymere . . . . .	18
2.3.3	Elektorrheologische Flüssigkeiten . . . . .	21
2.3.4	Funktionspolymere in der Informationstechnologie . . . . .	23
2.3.4.1	Polymere Datenspeicher . . . . .	23
2.3.4.2	Polymere Displays . . . . .	25
3	Der makromolekulare Aufbau der Kunststoffe . . . . .	27
3.1	Bildung von Makromolekülen . . . . .	27
3.2	Einführende Darstellung in Aufbau und Eigenschaften . . . . .	31
3.2.1	Lineare Makromoleküle . . . . .	31
3.2.2	Vernetzte Makromoleküle . . . . .	32
3.3	Die Bildung und Herstellung von Polymeren . . . . .	33
3.3.1	Thermoplaste . . . . .	33
3.3.1.1	Ungesättigte Bindungen, Polymerisation . . . . .	33
3.3.1.2	Reaktive Endgruppen, Polyaddition und Polykondensation . . . . .	35
3.3.2	Elastomere und Duroplaste . . . . .	37
3.3.2.1	Vernetzung über ungesättigte Bindungen . . . . .	38
3.3.2.2	Vernetzung über reaktive Gruppen . . . . .	38
3.3.2.3	Vernetzung über Strahlung oder Peroxide . . . . .	39
3.3.2.4	Leiterpolymere . . . . .	39
3.3.3	Copolymerisate und Pfropfpolymerisate . . . . .	40
3.3.4	Polymer-Blends . . . . .	41
3.3.5	Verfahrenstechnik zur Herstellung von Polymeren . . . . .	41

4 Bindungskräfte und Aufbau von Polymerwerkstoffen . . . . .	44
4.1 Hauptvalenzbindungen . . . . .	44
4.1.1 Kovalente Atombindung . . . . .	44
4.1.2 Ionenbindung . . . . .	46
4.2 Zwischenmolekulare Kräfte (Nebervalenzkräfte/Sekundärbindungen) . . . . .	47
4.2.1 Dispersionskräfte . . . . .	47
4.2.2 Dipolkräfte . . . . .	48
4.2.3 Vergleich der verschiedenen Nebervalenzkräfte . . . . .	49
4.3 Struktur und Eigenschaften . . . . .	50
4.3.1 Primärstruktur und Eigenschaften . . . . .	50
4.3.1.1 Molekülordnung . . . . .	51
4.3.1.2 Sterische Ordnung . . . . .	51
4.3.1.3 Taktizität . . . . .	52
4.3.1.4 Konfiguration der Doppelbindungen in der Kette . . . . .	53
4.3.1.5 Verzweigungen . . . . .	54
4.3.2 Molekulargewicht . . . . .	55
4.3.2.1 Molekulargewichtsbestimmung . . . . .	58
4.3.2.2 Bestimmung der Molekülmasseverteilung . . . . .	60
4.3.3 Sekundärstruktur und Eigenschaften . . . . .	62
4.3.4 Supermolekulare Strukturen . . . . .	67
4.3.4.1 Vernetzungen . . . . .	67
4.3.4.2 Kristallisation . . . . .	68
4.4 Einlagerung von Fremdmolekülen . . . . .	70
4.4.1 Copolymerisation (Einbau in die Kette) . . . . .	70
4.4.1.1 Amorphe Copolymere . . . . .	71
4.4.1.2 Teilkristalline Copolymere am Beispiel von Copolymeren aus PE und PP . . . . .	71
4.4.1.3 Besondere Copolymere . . . . .	73
4.4.1.4 Polyalze (Intrinsisch leitfähige Polymere, ICP Intrinsic Conductive Polymers) . . . . .	75
4.4.2 Polymergemische (Polymerblends) . . . . .	75
4.4.2.1 Homogene Gemische aus verträglichen Polymeren . . . . .	75
4.4.2.2 Mischungen aus begrenzt verträglichen Polymeren . . . . .	76
4.4.2.3 Mehrphasengemische . . . . .	76
4.4.3 Nanocomposites . . . . .	80
4.4.3.1 Aufbau von Nanocomposites . . . . .	81
4.4.3.2 Eigenschaften von Nanocomposites . . . . .	83
4.4.3.3 Anwendungen von Nanocomposites . . . . .	85
5 Verhalten in der Schmelze . . . . .	87
5.1 Scherrheologische Eigenschaften . . . . .	87
5.1.1 Stationäres viskoses Fließen . . . . .	88
5.1.1.1 Die stationäre Scherviskosität . . . . .	89
5.1.1.2 Schergeschwindigkeitsabhängigkeit der Viskosität . . . . .	89
5.1.1.3 Temperatur- und Druckabhängigkeit . . . . .	93
5.1.1.4 Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt . . . . .	97
5.1.1.5 Druckströmungen in einfachen Fließkanälen . . . . .	99
5.1.1.6 Erwärmung infolge des Scherfließens . . . . .	101
5.1.1.7 Praktisches Verhalten ausgewählter Polymerschmelzen . . . . .	102

5.1.2	Viskoelastische Eigenschaften . . . . .	103
5.1.2.1	Mechanische Ersatzmodelle . . . . .	104
5.1.2.2	Die Deborah-Zahl . . . . .	108
5.1.2.3	Bedeutung für die Verarbeitung . . . . .	108
5.1.3	Polymere mit zeitlich veränderlichen Fließeigenschaften . . . . .	111
5.1.3.1	Vernetzende Systeme . . . . .	111
5.1.3.2	Chemischer Abbau . . . . .	112
5.1.4	Messtechnik . . . . .	113
5.1.4.1	Das Schmelzeindexmessgerät . . . . .	113
5.1.4.2	Kapillarrheometer . . . . .	115
5.1.4.3	Rotationsrheometer . . . . .	116
5.2	Dehnrheologische Eigenschaften . . . . .	119
5.2.1	Uniaxiale Dehnung . . . . .	119
5.2.1.1	Messtechnik . . . . .	121
5.2.2	Biaxiale Dehnung . . . . .	123
5.2.2.1	Messtechnik . . . . .	123
5.3	Molekülorientierungen und Relaxation . . . . .	124
5.3.1	Die Relaxation als thermodynamische Reaktion . . . . .	124
5.3.2	Orientierung . . . . .	125
5.3.3	Halbwertzeiten der Relaxation . . . . .	129
6	Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur . . . . .	134
6.1	Struktur und innere Eigenschaften . . . . .	134
6.1.1	Thermodynamischer Zustand . . . . .	134
6.1.2	Morphologische Struktur . . . . .	138
6.1.3	Kristallisation . . . . .	139
6.1.3.1	Grundlagen der Kristallentstehung . . . . .	139
6.1.3.2	Kristallstrukturen . . . . .	141
6.1.3.3	Energetische Bedingung der Keimbildung . . . . .	142
6.1.3.4	Thermische und athermische Keimbildung . . . . .	144
6.1.3.5	Homogene und heterogene Keimbildung . . . . .	145
6.1.3.6	Primär-, Sekundär- und Tertiärkeimbildung . . . . .	145
6.1.3.7	Keimbildung durch Nukleierung . . . . .	146
6.1.3.8	Kristallit und Sphärolithbildung . . . . .	147
6.1.3.9	Berechnung des Kristallisationsgrads . . . . .	148
6.1.3.10	Gefügebeobachtungen . . . . .	149
6.1.4	Verbindungen an Struktur- und Phasengrenzen im Innern von Polymeren . . . . .	150
6.2	Das Verformungsverhalten fester Kunststoffe . . . . .	152
6.2.1	Theorie der Viskoelastizität . . . . .	158
6.2.1.1	Lineare Viskoelastizität . . . . .	158
6.2.1.2	Grenzen der linearen Viskoelastizität . . . . .	165
6.2.1.3	Modellierung der nichtlinearen Viskoelastizität . . . . .	166
6.2.1.4	Arbeitsweise des Deformationsmodells . . . . .	168
6.2.2	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Kunststoffe . . . . .	173
6.2.2.1	Die dynamisch-mechanische Analyse . . . . .	173
6.2.2.2	Der Zugversuch . . . . .	174
6.2.2.3	Der Zeitstandzugversuch (Kriechversuch) . . . . .	175
6.2.2.4	Der dehnungsgeregelte Zugversuch . . . . .	175
6.3	Die Zustandsbereiche im mechanischen (elastischen) Verhalten von Kunststoffen . . . . .	178

6.3.1	Amorphe Thermoplaste . . . . .	178
6.3.2	Teilkristalline Thermoplaste . . . . .	181
6.3.3	Verstreckte Thermoplaste . . . . .	183
6.3.4	Vernetzte Polymere (Duroplaste und Elastomere) . . . . .	189
6.3.5	Nebervalenzgele . . . . .	191
6.3.6	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe . . . . .	192
6.3.6.1	Rohstoffe und Herstellung . . . . .	192
6.3.6.2	Die mechanischen Eigenschaften von gefüllten Kunststoffen . . . . .	193
6.4	Zusammenfassende Darstellung der Werkstoffzustände bei Hochpolymeren . . . . .	196
7	Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffteilen (Kunststoffteile unter mechanischer Belastung, Verhalten und Dimensionieren) . . . . .	198
7.1	Allgemeines . . . . .	198
7.2	Das Verhalten von (unverstärkten) Kunststoffen unter Zugbeanspruchung . . . . .	198
7.2.1	Homogene, isotrope und mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe unterhalb der kritischen Dehnung . . . . .	198
7.2.2	Homogene, isotrope oder mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe im Dehnbereich oberhalb der kritischen Dehnung bis zum Bruch . . . . .	204
7.2.3	Der Wirkungsmechanismus der Schlagzähweichmacher . . . . .	206
7.3	Festigkeitsrechnung gegen ruhende und schwingende Zugbelastung bei homogenen und gefüllten Kunststoffen . . . . .	207
7.3.1	Abschätzende Festigkeitsberechnung (Menges) . . . . .	207
7.3.1.1	Kennwerte . . . . .	207
7.3.1.2	Sicherheiten . . . . .	208
7.3.1.3	Festigkeitsrechnung . . . . .	208
7.3.2	Festigkeitsrechnung nach der für Metalle üblichen Weise . . . . .	211
7.3.2.1	Kennwerte . . . . .	211
7.3.2.2	Sicherheiten . . . . .	212
7.3.2.3	Festigkeitsberechnung . . . . .	212
7.3.3	Rechnung mit Zeitstandfestigkeiten . . . . .	212
7.3.3.1	Kennwerte . . . . .	213
7.3.3.2	Sicherheiten . . . . .	213
7.3.3.3	Festigkeitsrechnung . . . . .	213
7.3.4	Genaue Berechnungen und Belastungssimulation mit FEM oder ähnlichen Methoden . . . . .	213
7.3.4.1	Kennwerte . . . . .	214
7.3.4.2	Sicherheiten . . . . .	214
7.3.4.3	Rechnung . . . . .	214
7.4	Tragfähigkeitsberechnung unter dynamischer Belastung . . . . .	215
7.4.1	Versagen unter dynamischer (Schwing-)Beanspruchung im Dehnbereich . . . . .	215
7.4.1.1	Festigkeitsrechnung gegen schwingende Belastung mit Dehndeformationen . . . . .	217
7.4.2	Versagen unter Stoß und klassische Kennwerte . . . . .	217
7.4.3	Festigkeitsrechnung gegen Stoß . . . . .	218
7.4.3.1	Kennwerte . . . . .	219
7.4.3.2	Sicherheitskoeffizienten . . . . .	219
7.4.3.3	Festigkeitsrechnung . . . . .	219
7.4.3.4	Praktische Stoßprüfung . . . . .	219
7.5	Verhalten von Kunststoffbauteilen bei Druckspannungen (Schalen, Platten, Stäbe) . . . . .	220
7.6	Die Tragfähigkeit von faserverstärkten Kunststoffen . . . . .	225

7.6.1 Faserarten . . . . .	226
7.6.2 Aufmachung von Verstärkungsfasern . . . . .	227
7.6.3 Eigenschaften des Verbundes aus Fasern und Matrix . . . . .	229
7.6.4 Mechanismus der Tragfähigkeit von kurzfaserverstärkten Kunststoffen . . . . .	234
7.7 Reibung und Verschleiß . . . . .	236
7.7.1 Reibung . . . . .	236
7.7.2 Verschleiß . . . . .	242
8 Thermische Eigenschaften . . . . .	245
8.1 Thermische Stoffwerte . . . . .	245
8.1.1 Enthalpie . . . . .	245
8.1.2 Spezifische Wärme . . . . .	246
8.1.3 Dichte . . . . .	247
8.1.4 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	248
8.1.4.1 Wärmeleitfähigkeit in amorphen Thermoplasten . . . . .	251
8.1.4.2 Wärmeleitfähigkeit in teilkristallinen Thermoplasten . . . . .	251
8.1.5 Temperaturleitfähigkeit . . . . .	255
8.1.6 Wärmeeindringzahl . . . . .	256
8.1.7 Wärmeausdehnung . . . . .	257
8.1.8 Glastemperatur (Einfriertemperatur) . . . . .	258
8.2 Messung kalorischer Daten . . . . .	258
8.2.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	258
8.2.2 Thermische Zersetzung von Kunststoffen . . . . .	260
8.2.3 Wärmeformbeständigkeit . . . . .	261
8.2.3.1 Die Vicat-Temperatur (DIN 53460) . . . . .	262
8.2.3.2 Die Heat-Distortion-Temperatur (HDT) (ASTM D 648-72) . . . . .	262
8.2.4 Thermoanalyse . . . . .	262
8.2.4.1 Die Differential-Thermoanalyse (DTA) . . . . .	262
8.2.4.2 Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) . . . . .	263
8.2.4.3 Thermomechanische Analyse (TMA) . . . . .	266
8.2.5 Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) . . . . .	267
8.2.6 Thermogravimetrie (TGA) . . . . .	267
9 Elektrische Eigenschaften . . . . .	269
9.1 Kunststoffe in elektrischen Feldern . . . . .	269
9.1.1 Kunststoffe in statischen Feldern . . . . .	269
9.1.2 Die dielektrische Polarisierung . . . . .	271
9.1.2.1 Verschiebungspolarisation . . . . .	271
9.1.2.2 Orientierungspolarisation . . . . .	273
9.1.3 Kunststoffe im elektrischen Wechselfeld – Dielektrische Verluste . . . . .	273
9.1.4 Elektrisch-mechanische Analogie . . . . .	276
9.2 Elektrische Leitungsvorgänge in Kunststoffen . . . . .	278
9.2.1 Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	278
9.2.2 Elektrische Kennwerte . . . . .	279
9.2.2.1 Oberflächenwiderstand . . . . .	280
9.2.2.2 Kriechstromfestigkeit . . . . .	280
9.2.2.3 Durchschlagsfestigkeit . . . . .	280
9.2.3 Die elektrostatische Aufladung . . . . .	283

9.3	Kunststoffe mit speziellen elektrischen Eigenschaften . . . . .	284
9.3.1	Elektrisch leitfähige Compounds . . . . .	284
9.3.2	Intrinsisch leitfähige Polymere . . . . .	285
9.3.3	Elektrete . . . . .	288
9.4	Magnetische Eigenschaften . . . . .	288
9.4.1	Magnetisierbarkeit . . . . .	288
9.4.2	Magnetische Resonanz . . . . .	289
10	Optische Eigenschaften . . . . .	291
10.1	Die Grundgesetzmäßigkeiten . . . . .	291
10.2	Der Realteil der Brechung . . . . .	292
10.3	Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl (Dispersion des Lichtes) . . . . .	293
10.4	Der imaginäre Teil der Brechzahl . . . . .	295
10.4.1	Absorption und Streuung . . . . .	295
10.4.2	Absorption, Reflexion und Transmission . . . . .	295
10.5	Die Totalreflexion . . . . .	298
10.6	Glanz, Farbe und Trübung . . . . .	298
10.7	Einfärben von Kunststoffen . . . . .	300
10.7.1	Farbmessung . . . . .	302
10.8	Die Anwendung der Infrarotstrahlung in der Kunststoffindustrie . . . . .	304
10.8.1	Infrarotspektroskopie . . . . .	304
10.8.2	Aufheizung . . . . .	306
10.8.3	Berührungslose Temperaturmessung von Kunststoffoberflächen . . . . .	307
10.9	Doppelbrechung . . . . .	308
10.10	Lichtstreuung in Mehrphasenkunststoffen . . . . .	309
11	Akustische Eigenschaften . . . . .	311
11.1	Akustische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen . . . . .	312
11.2	Dämmung und Dämpfung . . . . .	313
11.3	Körperschall . . . . .	317
11.4	Was ist Schall? . . . . .	318
11.5	Möglichkeiten der Lärmreduzierung . . . . .	320
12	Einfluss der Nebenvalenzkräfte auf das Lösungsverhalten . . . . .	324
12.1	Lösungen und Mischungen . . . . .	324
12.2	Polymerlösungen . . . . .	325
12.3	Anwendung . . . . .	328
12.3.1	Herstellen von Gießfolien . . . . .	328
12.3.2	Weichmachen . . . . .	329
12.4	Polymergemische . . . . .	329

13	Oberflächenspannung . . . . .	333
13.1	Oberflächenspannung und Benetzungsfähigkeit . . . . .	333
13.2	Grundlagen . . . . .	334
13.3	Bestimmung der Oberflächenspannung von Festkörpern . . . . .	335
13.3.1	Methode nach Zisman . . . . .	335
13.3.2	Methode nach Fowkes . . . . .	336
13.4	Messung der Oberflächenspannung von Festkörpern mittels Kontaktwinkelbestimmung . . . . .	337
13.4.1	Die Methode des liegenden Tropfens . . . . .	337
13.4.2	Die Wilhelmy-Methode . . . . .	338
13.4.3	Die Steighöhenmethode . . . . .	339
13.5	Messung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten und Schmelzen . . . . .	340
13.5.1	Methode des hängenden Tropfens (Pendant Drop-Methode) . . . . .	340
13.5.2	Volumetrische Tropfenmethode (Drop Volume-Methode) . . . . .	341
13.5.3	Ringmethode nach du Noüy . . . . .	341
13.5.4	Spinnig Drop-Methode . . . . .	343
14	Stofftransportvorgänge . . . . .	345
14.1	Einführung . . . . .	345
14.1.1	Diffusion . . . . .	345
14.1.2	Permeation . . . . .	346
14.2	Grundlagen . . . . .	346
14.2.1	Physikalische Beschreibung . . . . .	348
14.2.1.1	Adsorption . . . . .	348
14.2.1.2	Absorption . . . . .	348
14.2.1.3	Desorption . . . . .	349
14.2.1.4	Diffusion . . . . .	349
14.2.1.5	Permeation . . . . .	350
14.3	Temperaturabhängigkeit des Stofftransports . . . . .	352
14.4	Permeationsbestimmende Eigenschaften der Polymere . . . . .	354
14.4.1	Elastomere . . . . .	354
14.4.2	Duroplaste . . . . .	355
14.4.3	Thermoplaste . . . . .	355
14.4.3.1	Kristallinität . . . . .	355
14.4.3.2	Orientierung der Polymerketten . . . . .	357
14.5	Abschätzung permeationsbestimmender Koeffizienten . . . . .	357
14.5.1	Löslichkeitskoeffizient . . . . .	357
14.5.2	Diffusionskoeffizient . . . . .	357
14.6	Messung von Permeationsgrößen . . . . .	360
14.6.1	Sorptionmessverfahren . . . . .	361
14.6.2	Trägergasverfahren . . . . .	362
14.6.2.1	Time lag-Methode . . . . .	364

14.7	Permeation von Dämpfen durch Kunststoffe . . . . .	365
14.7.1	Sorption und Diffusion von Wasser durch Kunststoffe . . . . .	367
14.8	Maßnahmen zur Permeationsminderung . . . . .	368
14.8.1	Mehrschichtige Verbundsysteme . . . . .	369
14.8.2	Kunststoff-Folien . . . . .	370
14.8.3	Kunststoff-Rohre . . . . .	371
14.8.4	Kunststoff-Hohlkörper . . . . .	371
14.9	Das mechanische Tragverhalten unter physikalischer Einwirkung von spannungsrisserzeugenden Umgebungsmedien . . . . .	373
15	Der chemische Abbau von Polymeren . . . . .	378
15.1	Abbaumechanismen . . . . .	378
15.2	Einwirkung thermischer Energie . . . . .	380
15.2.1	Allgemeines . . . . .	380
15.2.2	Depolymerisation . . . . .	380
15.2.3	Abbau durch Einwirkung von Wärme und Scherung . . . . .	381
15.3	Einwirkung von Chemikalien . . . . .	383
15.3.1	Allgemeines . . . . .	383
15.3.2	Hydrolyse . . . . .	385
15.3.3	Oxidation . . . . .	386
15.3.4	Degradation von PVC . . . . .	386
15.4	Wirkung von elektromagnetischer und Korpuskularstrahlung . . . . .	388
15.4.1	Lichteinwirkung . . . . .	388
15.4.2	Andere Strahlungsformen . . . . .	388
15.4.3	Änderung von Struktur und Eigenschaften . . . . .	389
15.4.4	Witterungseinflüsse . . . . .	392
15.5	Biologische Einwirkung . . . . .	392
15.6	Stabilisierung . . . . .	393
15.7	Pyrolyse und Brand . . . . .	393
15.7.1	Pyrolyse . . . . .	393
15.7.2	Brandverhalten . . . . .	394
15.7.2.1	Physikalisch-chemische Grundlagen und Prüfungen . . . . .	394
15.7.2.2	Verbesserung des Brandverhaltens . . . . .	397
16	Recycling von Kunststoffen . . . . .	399
17	Physiologische Wirkung (Wirkung auf den Menschen) . . . . .	401
18	Allgemeine Literatur . . . . .	403
	Sachverzeichnis . . . . .	406