

# 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	Elektrorheologische 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	Polysalze (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	Genauere 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 Dehn deformationen	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 Polarisation . . . . .	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	Sorptionsmessverfahren . . . . .	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 spannungsriss erzeugenden 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