

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	Halbwertszeiten 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	Wärmeindringzahl	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 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