

**Georg Menges
Edmund Haberstroh
Walter Michaeli
Ernst Schmachtenberg**

Menges Werkstoffkunde Kunststoffe

6. Auflage

HANSER

Inhalt

1	Entwicklung und historische Bedeutung der Kunststoffe	1
1.1	Die Entwicklung der Kunststoffe	1
1.2	Definition und Namen	8
2	Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen kurz gefasst	13
2.1	Hervorstechende Eigenschaften der Kunststoffe im Vergleich mit anderen Werkstoffen	13
2.1.1	Kunststoffe sind leicht	13
2.1.2	Kunststoffe sind flexibel	13
2.1.3	Kunststoffe haben eine niedrige Verarbeitungs-(Urform-) Temperatur und ihre Schmelzen sind oft zähflüssig	14
2.1.4	Kunststoffe haben niedrige Leitfähigkeiten	16
2.1.5	Eine ganze Reihe von Kunststoffen ist transparent	16
2.1.6	Kunststoffe haben eine hohe chemische Beständigkeit	17
2.1.7	Kunststoffe sind durchlässig (Permeation, Diffusion)	17
2.1.8	Kunststoffe lassen sich mit Hilfe unterschiedlicher und vielseitiger Methoden wieder verwenden bzw. verwerten (Recycling)	17
2.2	Anwendung der Kunststoffe	19
2.2.1	Strukturpolymere	19
2.2.2	Funktionspolymere	22
2.2.2.1	Allgemeines	22
2.2.2.2	Schaltbare Polymere	23
2.2.2.3	Elektorrheologische Flüssigkeiten	24
2.2.2.4	Polymere Datenspeicher	27
2.2.2.5	Polymere Displays	28
3	Der makromolekulare Aufbau der Kunststoffe	31
3.1	Bildung von Makromolekülen	31
3.2	Einführende Darstellung in Aufbau und Eigenschaften	36
3.2.1	Lineare Makromoleküle	36
3.2.2	Vernetzte Makromoleküle	37
3.3	Die Bildung und Herstellung von Polymeren	38
3.3.1	Thermoplaste	38
3.3.1.1	Ungesättigte Bindungen, Polymerisation	38
3.3.1.2	Reaktive Endgruppen, Polyaddition und Polykondensation	41
3.3.2	Elastomere und Duroplaste	44
3.3.2.1	Vernetzungen über ungesättigte Bindungen, die in den eingebundenen Monomeren noch verblieben sind	44

3.3.2.2	Vernetzung über reaktive Gruppen.	44
3.3.2.3	Vernetzung über Strahlung oder Peroxide.	45
3.3.2.4	Leiterpolymere.	45
3.3.3	Copolymerisate und Pfropfpolymerisate.	46
3.3.4	Polymerblends.	48
3.3.5	Verfahrenstechnik zur Herstellung von Polymeren.	48
3.4	Biopolymere.	50
3.4.1	Definitionen.	50
3.4.2	Produkte.	52
3.4.3	Bandbreite der Biopolymere.	52
3.4.4	Biopolymere natürlichen Ursprungs.	53
3.4.4.1	Polylactid (Polymilchsäure).	53
3.4.4.2	Polysaccharide.	54
3.4.4.3	Polyhydroxyalkanoate.	54
3.4.5	Biopolymere fossilen Ursprungs mit der Eigenschaft biologischer Abbaubarkeit	55
3.4.5.1	Polyester.	55
3.4.5.2	Polyesteramide.	55
3.4.6	Marktsituation.	56
4	Aufbau, Bindungskräfte, Füllstoffe und davon beeinflusste Eigenschaften von Polymerwerkstoffen.	59
4.1	Hauptvalenzbindungen.	59
4.1.1	Kovalente Atombindung.	59
4.1.2	Ionenbindung.	61
4.2	Zwischenmolekulare Kräfte (Nebervalenzkräfte/Sekundärbindungen)....	62
4.2.1	Dispersionskräfte.	62
4.2.2	Dipolkräfte.	63
4.2.3	Wasserstoffbrückenbindungen.	63
4.2.4	Vergleich der verschiedenen Nebervalenzkräfte.	64
4.3	Struktur und Eigenschaften.	65
4.3.1	Primärstruktur und Eigenschaften.	65
4.3.1.1	Molekülordnung.	66
4.3.1.2	Sterische Ordnung.	66
4.3.1.3	Taktizität	67
4.3.1.4	Konfiguration der Doppelbindungen in der Kette.	68
4.3.1.5	Verzweigungen.	68
4.3.2	Die Molmasse (früher Molekulargewicht).	70
4.3.2.1	Molmassen-(Molekulargewichts-) Bestimmung.	73
4.3.2.2	Bestimmung der Molmassenverteilung.	76
4.3.3	Sekundärstruktur und Eigenschaften.	77
4.3.4	Supermolekulare Strukturen.	82
4.3.4.1	Vernetzungen.	82
4.3.4.2	Kristallisation.	83

4.4	Einlagerung von Fremdmolekülen.	84
4.4.1	Copolymerisation (Einbau in die Kette).	85
4.4.1.1	Amorphe Copolymere.	85
4.4.1.2	Teilkristalline Copolymere am Beispiel von Copolymeren aus PE und PP.	86
4.4.1.3	Besondere Copolymere.	88
4.4.2	Besondere Polymere.	88
4.4.2.1	Flüssigkristalline Kunststoffe (liquid crystalline polymers, LCP).	88
4.4.2.2	Polysalze (intrinsisch leitfähige Polymere, intrinsic conductive polymers, ICP).	89
4.5	Polymergemische (Polymerblends).	90
4.5.1	Homogene Gemische aus verträglichen Polymeren.	90
4.5.2	Mischungen aus begrenzt verträglichen Polymeren.	90
4.5.3	Mehrphasengemische.	91
4.6	Modifizierungen durch Füllstoffe (Polymercompounds).	94
4.6.1	Verarbeitungsfördernde Zusatzstoffe.	94
4.6.1.1	Gleitmittel.	94
4.6.1.2	Wärmestabilisatoren.	95
4.6.1.3	Haftvermittler.	95
4.6.1.4	Trennmittel.	95
4.6.1.5	Thixotropiemittel.	95
4.6.2	Produkteigenschaftsverbessernde Zusatzstoffe.	95
4.6.2.1	Festigkeitserhöhende Zusatzstoffe.	96
4.6.2.2	Steifigkeitserhöhende Zusatzstoffe.	96
4.6.2.3	Weichmacher.	96
4.6.2.4	Reagierende Zusatzstoffe.	96
4.6.2.5	Gebrauchsfähigkeitsverlängemde Zusatzstoffe.	97
4.6.2.6	Färbende Zusatzstoffe.	97
4.6.2.7	Nanofüllstoffe.	98
4.6.2.8	Treibmittel.	100
	Verhalten in der Schmelze.	103
5.1	Viskose Kunststoffschnmelzen unter stationärer Scherströmung.	105
5.1.1	Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit.	106
5.1.2	Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Druck.	110
5.1.3	Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt.	115
5.1.4	Druckströmungen in einfachen Fließkanälen.	117
5.1.5	Erwärmung infolge des Scherfließens.	120
5.1.6	Schergeschwindigkeitsbereiche in Verarbeitungsprozessen.	121
5.2	Viskoelastische Kunststoffschnmelzen und spezielle Fließphänomene.	122
5.2.1	Viskoelastische Eigenschaften und ihre Beschreibung.	122
5.2.2	Mechanische Ersatzmodelle.	124
5.2.3	Die Deborah-Zahl.	129

5.2.4	Bedeutung für die Verarbeitung	130
5.2.5	Polymere mit zeitlich veränderlichen Fließeigenschaften	132
5.2.5.1	Vernetzende Systeme	133
5.2.5.2	Chemischer Abbau	134
5.3	Messtechnik	135
5.3.1	Prüftechnik zur Bestimmung der Scherviskosität	135
5.3.1.1	Das Schmelzindexmessgerät	135
5.3.1.2	Kapillarrheometer	136
5.3.1.3	Rotationsrheometer	139
5.3.1.4	Vergleich der Fließeigenschaften nach zwei unterschiedlichen Messprinzipien	142
5.3.2	Prüftechnik zur Bestimmung der Dehnviskosität	145
5.3.2.1	Messtechnik für die uniaxialen Dehnung	145
5.3.2.2	Messtechnik für die biaxialen Dehnung	149
5.4	Molekülorientierungen und Relaxation	150
5.4.1	Die Relaxation als thermodynamische Reaktion	151
5.4.2	Orientierung	151
5.4.3	Halbwertzeiten der Relaxation	156
6	Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur	163
6.1	Struktur und innere Eigenschaften	163
6.1.1	Thermodynamischer Zustand	163
6.1.2	Morphologische Struktur	168
6.1.3	Kristallisation	169
6.1.3.1	Grundlagen der Kristallentstehung	169
6.1.3.2	Kristallstrukturen	170
6.1.3.3	Energetische Bedingung für Keimbildung und Wachstum der Kristallite	171
6.1.3.4	Modelle zur Beschreibung der Keimbildung	174
6.1.3.5	Keimbildung durch Nukleierung	175
6.1.3.6	Kristallit- und Sphärolithbildung	175
6.1.3.7	Berechnung des Kristallisationsgrads	177
6.1.3.8	Gefügebeobachtungen	178
6.1.4	Verbindungen an Struktur- und Phasengrenzen im Innern von Polymeren	179
6.2	Das Verformungsverhalten fester Kunststoffe	180
6.2.1	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Kunststoffe	187
6.2.1.1	Die dynamisch-mechanische Analyse	187
6.2.1.2	Der Zugversuch	188
6.2.1.3	Der dehnungsgeregelte Zugversuch	190
6.2.1.4	Der Zeitstandzugversuch (Kriechversuch)	190
6.2.1.5	Der Relaxationsversuch	191
6.2.1.6	Zeitraffende Prüfung	192

6.2.2	Theorie der Viskoelastizität	196
6.2.2.1	Modelle der Linearen Viskoelastizität	197
6.2.2.2	Modellierung der nichtlinearen Viskoelastizität	201
6.2.2.3	Vorgehensweise bei der Berechnung des Verformungsverhaltens.	203
6.3	Die Zustandsbereiche im mechanischen (elastischen) Verhalten von Kunststoffen.	205
6.3.1	Amorphe Thermoplaste.	205
6.3.2	Teilkristalline Thermoplaste.	208
6.3.3	Verstreckte Thermoplaste.	210
6.3.4	Vernetzte Polymere (Duroplaste und Elastomere).	216
6.3.5	Nebenvale n zgele.	218
6.3.6	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe.	219
6.3.6.1	Rohstoffe und Herstellung.	219
6.3.6.2	Die mechanischen Eigenschaften von gefüllten Kunststoffen.	221
6.4	Zusammenfassende Darstellung der Werkstoffzustände bei Hochpolymeren.	224
	Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffteilen.	227
7.1	Allgemeines.	227
7.2	Das Verhalten von (unverstärkten) Kunststoffen unter Zugbeanspruchung.	228
7.2.1	Homogene, isotrope und mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe unterhalb der kritischen Dehnung.	228
7.2.2	Homogene, isotrope oder mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe im Dehnbereich oberhalb der kritischen Dehnung bis zum Bruch.	233
7.2.3	Der Wirkungsmechanismus der Schlagzähweichmacher.	235
7.3	Festigkeitsrechnung gegen ruhende und schwingende Zugbelastung.	236
7.3.1	Abschätzende Festigkeitsberechnung (nach Menges).	237
7.3.1.1	Kennwerte für die abschätzende Festigkeitsrechnung	237
7.3.1.2	Praktisches Vorgehen bei abschätzender Festigkeits- rechnung.	238
7.3.2	Festigkeitsrechnung nach üblichen Methoden.	239
7.3.2.1	Vorschlag zu einer genauen Festigkeitsrechnung (nach Schmachtenberg).	239
7.3.2.2	Kennwerte aus Datenbanken.	241
7.3.2.3	Festigkeitsberechnung nach der für metallische Konstruktionen üblichen Methode.	242
7.3.3	Rechnung mit Zeitstandfestigkeiten.	242
7.3.3.1	Kennwerte.	242
7.3.3.2	Sicherheiten.	243
7.3.3.3	Festigkeitsrechnung.	243

7.3.4	Genaue Berechnungen und Belastungssimulation mit FEM oder ähnlichen Methoden.	243
7.3.4.1	Kennwerte.	244
7.3.4.2	Sicherheiten.	244
7.3.4.3	Rechnung.	245
7.4	Tragfähigkeitsberechnung unter dynamischer Belastung.	245
7.4.1	Versagen unter dynamischer (Schwing-)Beanspruchung im Dehnbereich.	245
7.4.1.1	Festigkeitsrechnung gegen schwingende Belastung mit Dehndeformationen.	247
7.4.2	Versagen unter Stoß und klassische Kennwerte.	248
7.4.2.1	Für eine Abschätzung der Stoßenergie brauchbarer Kennwert.	249
7.4.2.2	Sicherheitskoeffizienten.	250
7.4.2.3	Festigkeitsrechnung.	250
7.4.2.4	Praktische Stoßprüfung.	250
7.5	Verhalten von Kunststoffbauteilen bei Druckspannungen (Schalen, Platten, Stäbe).	251
7.6	Die Tragfähigkeit von faserverstärkten Kunststoffen.	257
7.6.1	Faserarten.	258
7.6.2	Aufmachung von Verstärkungsfasern.	260
7.6.3	Eigenschaften des Verbundes aus Fasern und Matrix.	261
7.6.4	Mechanismus der Tragfähigkeit von kurzfaserverstärkten Kunststoffen.	266
7.7	Reibung und Verschleiß.	268
7.7.1	Reibung.	268
7.7.2	Verschleiß.	275
	Thermische Eigenschaften.	281
8.1	Thermische Stoffwerte.	281
8.1.1	Enthalpie.	281
8.1.2	Spezifische Wärmekapazität.	283
8.1.3	Dichte.	284
8.1.4	Wärmeleitfähigkeit.	285
8.1.5	Temperaturleitfähigkeit.	291
8.1.6	Wärmeeindringzahl.	292
8.1.7	Wärmeausdehnung.	293
8.1.8	Glastemperatur (Einfriertemperatur).	294
8.2	Messung kalorischer Daten.	295
8.2.1	Messung der Wärmeleitfähigkeit.	295
8.2.2	Messung der Dichte.	297
8.2.3	Thermische Zersetzung von Kunststoffen (vgl. Abschnitte 5.1.3.2 und 15.7.2).	297
8.2.4	Wärmeformbeständigkeit.	298

8.2.4.1	Die Vicat-Temperatur (DIN EN ISO 306).	299
8.2.4.2	Die Heat-Distortion-Temperatur (HDT) (ASTM D 648-72)	299
8.2.5	Thermoanalyse.	300
8.2.5.1	Die Differential-Thermoanalyse (DTA).	300
8.2.5.2	Differential-Scanning-Calorimetry (DSC).	301
8.2.5.3	Thermomechanische Analyse (TMA).	304
8.2.6	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA).	305
8.2.7	Thermogravimetrie (TGA).	305
8.2.8	Druck-Volumen-Temperatur-Verhalten (pVT).	305
8.2.9	Wärmeübergang.	306
9	Elektrische Eigenschaften.	309
9.1	Das elektrische Isolationsverhalten.	310
9.1.1	Der elektrische Durchgangswiderstand.	310
9.1.2	Der elektrische Oberflächenwiderstand.	311
9.1.3	Einfluss langzeitiger elektrischer Beanspruchung.	312
9.1.4	Weitere für den praktischen Einsatz wichtige Prüfungen.	314
9.2	Kunststoffe in elektrischen Feldern.	314
9.2.1	Dielektrisches Verhalten.	314
9.2.1.1	Die relative Permittivität ϵ_r .	315
9.2.1.2	Die dielektrischen Verluste.	316
9.3	Die elektrostatische Aufladung und Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen.	318
9.3.1	Elektrostatische Aufladung.	318
9.3.2	Schirmdämpfung, besser bekannt als Electro-Magnetic Interference (EMI).	319
9.3.3	Polymere mit besonderen elektrischen Eigenschaften.	320
9.3.3.1	Intrinsisch leitfähige Polymere.	320
9.3.3.2	Elektrete.	323
9.3.3.3	Elektrooptische Polymere (OLED).	323
9.4	Magnetische Eigenschaften.	323
9.4.1	Magnetisierbarkeit.	323
9.4.2	Magnetische Resonanz.	324
10	Optische Eigenschaften.	327
10.1	Die Grundgesetzmäßigkeiten).	327
10.2	Der Realteil der Brechung.	328
10.3	Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl (Dispersion des Lichts).	330
10.4	Der imaginäre Teil der Brechzahl.	332
10.4.1	Absorption und Streuung.	332
10.4.2	Absorption, Reflexion und Transmission.	332
10.5	Die Totalreflexion.	335
10.6	Farbe, Glanz und Trübung.	336

10.7	Einfärben von Kunststoffen.	339
10.7.1	Farbmessung.	341
10.8	Die Anwendung der Infrarotstrahlung in der Kunststoffindustrie.	344
10.8.1	Infrarotspektroskopie.	344
10.8.2	Aufheizung durch Infrarotstrahlung.	345
10.8.3	Kunststoffschweißen mittels Infrarotstrahlung.	347
10.8.4	Berührungslose Temperaturmessung von Kunststoffoberflächen ..	348
10.9	Doppelbrechung.	349
10.10	Lichtstreuung in Mehrphasenkunststoffen.	350
11	Akustische Eigenschaften.	353
11.1	Akustische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen.	354
11.2	Dämmung und Dämpfung.	356
11.3	Körperschall.	361
11.4	Was ist Schall?.	361
11.5	Möglichkeiten der Lärmreduzierung.	363
12	Oberflächenspannung.	367
12.1	Oberflächenspannung und Benetzungsfähigkeit	367
12.2	Grundlagen.	368
12.3	Bestimmung der Oberflächenspannung von Festkörpern.	370
12.3.1	Methode nach <i>Zisman</i>	370
12.3.2	Methode nach <i>Fowkes</i>	371
12.4	Charakterisierung der Oberflächenspannung von Festkörpern.	372
12.4.1	Die Methode des liegenden Tropfens.	372
12.4.2	Die <i>M/V/>>e/my</i> -Methode.	374
12.4.3	Die Steighöhenmethode.	375
12.5	Messung der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten und Schmelzen	376
12.5.1	Methode des hängenden Tropfens (Pendant Drop-Methode).	376
12.5.2	Volumetrische Tropfenmethode (Drop Volume Methode).	377
12.5.3	Ringmethode nach <i>du Noüy</i>	377
12.5.4	Spinning Drop-Methode.	379
13	Das Lösungsverhalten und der Einfluss der Nebenvaleanzkräfte.	381
13.1	Lösungen und Mischungen.	381
13.2	Polymerlösungen.	383
13.3	Anwendung.	386
13.3.1	Herstellen von Gießfolien.	386
13.3.2	Weichmachen.	386
13.4	Polymergemische.	387
14	Stofftransportvorgänge.	391
14.1	Einführung.	391
14.1.2	Permeation.	392
14.2	Grundlagen.	392

14.2.1	Physikalische Beschreibung	393
14.2.1.1	Adsorption	393
14.2.1.2	Absorption	394
14.2.1.3	Desorption	394
14.2.1.4	Diffusion	394
14.2.1.5	Permeation	395
14.3	Temperaturabhängigkeit des Stofftransports	397
14.4	Permeationsbestimmende Eigenschaften der Polymere	400
14.4.1	Elastomere	400
14.4.2	Duroplaste	400
14.4.3	Thermoplaste	401
14.4.3.1	Kristallinität	401
14.4.3.2	Orientierung der Polymerketten	402
14.5	Abschätzung permeationsbestimmender Koeffizienten	403
14.5.1	Löslichkeitskoeffizient	403
14.5.2	Diffusionskoeffizient	404
14.6	Messung von Permeationsgrößen	406
14.6.1	Sorptionsmessverfahren	407
14.6.2	Trägergasverfahren	408
14.6.2.1	Time lag-Methode	409
14.7	Permeation von organischen Dämpfen durch Kunststoffe	411
14.7.1	Sorption und Diffusion von Wasser durch Kunststoffe	413
14.8	Maßnahmen zur Permeationsminderung	414
14.8.1	Mehrschichtige Verbundsysteme	415
14.8.2	Anwendung bei Kunststoff-Folien	416
14.8.3	Anwendung bei Kunststoff-Rohren	416
14.8.4	Anwendung bei Kunststoff-Hohlkörpern	416
14.9	Das mechanische Tragverhalten unter physikalischer Einwirkung	418
15	Der Abbau von Polymeren	425
15.1	Abbaumechanismen	425
15.2	Einwirkung thermischer Energie	427
15.2.1	Allgemeines	427
15.2.2	Depolymerisation	427
15.2.3	Abbau durch Einwirkung von Wärme und Scherung	428
15.3	Einwirkung von Chemikalien	430
15.3.1	Allgemeines	430
15.3.2	Hydrolyse	432
15.3.3	Oxidation	433
15.3.4	Degradation von PVC	433
15.4	Wirkung von elektromagnetischer und Korpuskularstrahlung	434
15.4.1	Lichteinwirkung	434
15.4.2	Andere Strahlungsformen	434
15.4.3	Änderung von Struktur und Eigenschaften	436
15.4.4	Witterungseinflüsse	438

15.5	Biologische Einwirkungen.	43g
15.5.1	Biologische Angriffe auf Kunststoffe.	438
15.5.2	Physiologische Wirkung (Wirkung auf den Menschen).	439
15.6	Stabilisierung.	44Q
15.7	Pyrolyse und Brand.	441
15.7.1	Pyrolyse.	441
15.7.2	Brandverhalten.	44 ₁
15.7.2.1	Physikalisch-chemische Grundlagen und Prüfungen_____	441
15.7.2.2	Möglichkeiten zur Verbesserung des Brandverhaltens (oder der Verhinderung eines Brandes).	445