

Inhalt

Vorwort zur 7. Auflage	V
Die Autoren	IX
1 Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe	1
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
2 Bildung von Makromolekülen und Polymeren	27
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
3	Polymere Strukturen	73
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 Nebenvalenzkräfte	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

4	Verhalten im Schmelzzustand	119
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

5	Abkühlen aus der Schmelze und Entstehung von innerer Struktur	181
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
6	Mechanisches Verhalten von Kunststoffen	227
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
7	Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffprodukten	281
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
8	Thermische Eigenschaften und Analyse	359
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

9	Elektrische Eigenschaften	401
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 ϵ_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
10	Optische Eigenschaften	433
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
11	Akustische Eigenschaften	465
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
12	Stofftransportvorgänge	485
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 ₂ -spezifisches Trägergasverfahren nach DIN 53380-3 Teil 3 ..	513
12.7.7	O ₂ -Fluoreszenzverfahren	515
12.7.8	CO ₂ -spezifisches Infrarotabsorptionsverfahren nach DIN 53380-4 Teil 4	515
13	Die Alterung von Kunststoffen	519
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
14 Schadensanalyse an Kunststoffprodukten	557
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
Sachverzeichnis	587