

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	Elektrorheologische 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	Poly lactid (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	Gebrauchsfähigkeitsverlängernde Zusatzstoffe	97
4.6.2.6	Färbende Zusatzstoffe	97
4.6.2.7	Nanofüllstoffe	98
4.6.2.8	Treibmittel	100
5	Verhalten in der Schmelze	103
5.1	Viskose Kunststoffschmelzen 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 Kunststoffschmelzen 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	Nebervalenzgele	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
7	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	Genauere 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
8	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>Wilhelmy</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 Nebervalenzkräfte	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	438
15.5.1	Biologische Angriffe auf Kunststoffe	438
15.5.2	Physiologische Wirkung (Wirkung auf den Menschen)	439
15.6	Stabilisierung	440
15.7	Pyrolyse und Brand	441
15.7.1	Pyrolyse	441
15.7.2	Brandverhalten	441
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