

Georg Menges

Werkstoffkunde Kunststoffe

3., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage
mit 283 Abbildungen und 31 Tabellen



Carl Hanser Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

1 Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe	.1
2 Kunststoffe - Eigenschaften kurz gefaßt	9
2.1 Hervorstechende Eigenschaften der Kunststoffe im Vergleich mit anderen Werkstoffen	9
2.2 Bezeichnung der Kunststoffe	13
3 Der makromolekulare Aufbau der Kunststoffe	14
3.1 Bildung von Makromolekülen	14
3.2 Einführende Darstellung von Aufbau und Eigenschaften	17
3.3 Bildung von Polymeren	18
3.3.1 Thermoplaste	18
3.3.2 Elastomere und Duroplaste	20
3.3.3 Copolymerisate und Pfropfpolymerisate	23
3.3.4 Ablauf der Bildungsreaktion	24
4 Bindungskräfte und Aufbau von Polymerwerkstoffen	27
4.1 Hauptvalenzbindungen	27
4.2 Zwischenmolekulare Kräfte (Nebervalenzkräfte)	27
4.2.1 Dispersionskräfte	27
4.2.2 Dipolkräfte	28
4.2.3 Wasserstoffbrücken	29
4.2.4 Ionenbindung	30
4.3 Kräfte der Nebervalenzbindungen	30
4.4 Das Polymermolekül	31
4.4.1 Molekülordnung	33
4.4.1.1 Sterische Ordnung	33
4.4.1.2 Taktizität	33
4.4.1.3 Stellung der Doppelbindung in der Kette	34
4.4.1.4 Verzweigungen (Molekülgestalt)	34
4.4.1.5 Helixkonformation	36
4.4.2 Einfluß der Molekülgestalt	36
4.4.2.1 Kristallisation	42
4.4.3 Molekülgröße	43
4.4.3.1 Messung der Molekülmasse	46
4.4.3.2 Messung des Vernetzungsgrades	48
4.4.4 Einlagerung von Fremdatomen	49
4.4.4.1 Copolymerisation (Einbau in die Kette)	49
4.4.4.2 Polymergemische	52
4.4.5 Besondere Copolymere	56
4.4.5.1 Moleküle mit steifen Kettensegmenten (LC-Polymere)	56
4.4.5.2 Polysalze (Intrinsisch leitfähige Polymere)	57

5 Verhalten in der Schmelze	58
5.1 Fließeigenschaften	58
5.1.1 Das Verhalten von Kunststoffschmelzen beim Scherfließen (phänomenologische Beschreibung)	58
5.1.1.1 Der Schmelzindex	58
5.1.1.2 Das Scherfließverhalten in stationärer Strömung als Funktion der Schergeschwindigkeit	59
5.1.1.3 Erklärung des Fließverhaltens mit der Theorie des freien Volumens und praktische Nutzenanwendung	64
5.1.1.4 Die repräsentative Schergeschwindigkeit	66
5.1.1.5 Gefüllte Schmelzen	69
5.1.1.6 Erwärmung infolge des Scherfließens	70
5.1.1.7 Scherfließen - Anlaufen einer Strömung (instationäres Fließen)	71
5.1.1.8 Vergleich des praktischen Verhaltens einiger Polymerschmelzen beim stationären Scherfließen	73
5.1.2 Das Streckfließen (Dehnviskosität)	74
5.1.2.1 Stationäres Dehnen	74
5.1.2.2 Anlaufen einer Dehnströmung (instationäres Dehnen)	75
5.2 Elastisches Verhalten von Schmelzen	76
5.2.1 Erklärung des Deformationsverhaltens anhand mechanischer Modelle	76
5.2.2 Die Relaxation als thermodynamische Reaktion	80
5.2.3 Orientierung	80
5.2.4 Halbwertzeiten der Relaxation	85
5.2.5 Strangaufweitung	89
5.2.6 Schmelzbruch	90
5.3 Verhalten von Schmelzen unter langzeitiger Einwirkung von Wärme und Scherung	91
6 Abkühlen aus der Schmelze und fester Zustand	94
6.1 Abkühlen der Schmelzen von Thermoplasten	94
6.1.1 Thermodynamischer Zustand	94
6.1.2 Morphologische Struktur	97
6.1.3 Kristallisation	99
6.1.3.1 Kristallbildung, energetische Bedingung	100
6.1.3.2 Thermische und athermische Keimbildung	103
6.1.3.3 Homogene und heterogene Keimbildung	104
6.1.3.4 Primär-, Sekundär- und Tertiärkeimbildung	104
6.1.3.5 Keimbildung durch Nukleierung	105
6.1.3.6 Kristallit- und Sphärolithbildung	106
6.1.3.7 Berechnung der Kristallisationsgeschwindigkeit	109
6.1.3.8 Andere Kristallitformen	109
6.1.3.9 Gefügebeobachtung	110
6.1.4 Verbindung an Struktur- und Phasengrenzen im Innern von Polymeren	110
6.2 Elastisches Verhalten fester Kunststoffe	112
6.2.1 Theorie des elastischen Verhaltens	112
6.2.1.1 Viskoelastisches Verhalten	112
6.2.1.2 Linear-viskoelastisches Verhalten	113
6.2.2 Bestimmung des Elastizitätsmoduls viskoelastischer Kunststoffe	118
6.2.2.1 Der Torsionsschwingversuch	118
6.2.2.2 Der Zeitstandzugversuch	121
6.2.2.3 Der Kurzzeitzugversuch und die Erstellung von Kennfunktionen	122

6.2.2.4	Numerische Approximation der Kennfunktionen	127
6.2.2.5	Bestimmung der Kennfunktionen für geänderte Erweichungstemperatur des Werkstoffs	128
6.2.2.6	Umrechnung von in Datenbanken vorhandenen Stoffdaten in die Kennwerte des Deformationsmodells	130
6.3	Die Zustandsbereiche im mechanischen (elastischen) Verhalten von Kunststoffen	134
6.3.1	Amorphe Thermoplaste	134
6.3.2	Teilkristalline Thermoplaste	136
6.3.3	Verstreckte Thermoplaste	138
6.3.4	Vernetzte Polymere (Duroplaste und Elastomere)	143
6.3.5	Nebervalenzgele	145
6.3.6	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe	146
6.3.6.1	Rohstoffe und Herstellung	146
6.3.6.2	Die mechanischen Eigenschaften von gefüllten Kunststoffen	147
6.4	Zusammenfassende Darstellung der Werkstoffzustände bei Hochpolymeren	150
7	Die mechanische Tragfähigkeit von Kunststoffteilen (Kunststoffteile unter mechanischer Belastung, Verhalten und Dimensionieren)	151
7.1	Allgemeines	151
7.2	Das Verhalten von (unverstärkten) Kunststoffen unter Dehndeformation	151
7.2.1	Homogene, isotrope und mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe im linear-viskoelastischen Bereich	151
7.2.2	Homogene, isotrope oder mit harten Füllstoffpartikeln gefüllte Kunststoffe im Dehnbereich oberhalb der Linearitätsgrenze bis zum Bruch	159
7.2.3	Der Wirkungsmechanismus der Schlagzähweichmacher	160
7.3	Festigkeitsrechnung gegen ruhende und schwingende Zugbelastung bei homogenen und gefüllten Kunststoffen	162
7.3.1	Abschätzende Festigkeitsberechnung	162
7.3.1.1	Kennwerte	162
7.3.1.2	Sicherheiten	164
7.3.1.3	Festigkeitsrechnung	164
7.3.2	Festigkeitsrechnung nach der für Metalle üblichen Weise	166
7.3.2.1	Kennwerte	166
7.3.2.2	Sicherheiten	166
7.3.2.3	Festigkeitsberechnung	166
7.3.3	Rechnung mit Zeitstandfestigkeiten	167
7.3.3.1	Kennwerte	167
7.3.3.2	Sicherheiten	167
7.3.3.3	Festigkeitsrechnung	167
7.3.4	Genauere Berechnungen und Belastungssimulation mit FEM oder ähnlichen Methoden	168
7.3.4.1	Kennwerte	168
7.3.4.2	Sicherheiten	168
7.3.4.3	Rechnung	168
7.4	Tragfähigkeitsberechnung unter dynamischer Belastung	169
7.4.1	Versagen unter dynamischer (Schwing-)Beanspruchung im Dehnbereich	169
7.4.1.1	Festigkeitsrechnung gegen schwingende Belastung mit Dehndeformationen	170
7.4.2	Versagen unter Stoß und klassische Kennwerte	171
7.4.3	Festigkeitsrechnung gegen Stoß	172

7.4.3.1	Kennwerte	.172
7.4.3.2	Sicherheitskoeffizienten	.173
7.4.3.3	Festigkeitsrechnung	.173
7.5	Die Tragfähigkeit von langfaserverstärkten Kunststoffen	.174
7.5.1	Faserarten, Herstellung	.174
7.5.2	Der Mechanismus der Tragfähigkeit	.175
7.6	Verhalten von Kunststoffbauteilen bei Druckspannungen (Schalen, Platten, Stäbe)	.182
7.7	Reibung und Verschleiß	.185
7.7.1	Reibung	.185
7.7.2	Verschleiß	.190
8	Thermische Eigenschaften	.191
8.1	Stoffwerte	.191
8.1.1	Wärmeleitfähigkeit	.191
8.1.2	Wärmeübergang	.194
8.1.3	Die spezifische Wärme	.194
8.1.4	Dichte	.195
8.1.5	Wärmeausdehnung	.196
8.1.6	Temperaturleitzahl und Wärmeeindringzahl	.196
8.1.7	Glastemperatur (Einfriertemperatur)	.198
8.2	Die Messung kalorischer Daten	.199
8.2.1	Thermische Zersetzung von Kunststoffen	.199
8.2.2	Wärmeformbeständigkeit	.200
8.2.2.1	Die Vicat-Temperatur (DIN 53460)	.200
8.2.2.2	Die Heat-Distortion-Temperatur (HDT) (ASTM D 648-72)	.201
8.2.3	Thermoanalyse	.201
8.2.3.1	Die Differential-Thermoanalyse (DTA)	.201
8.2.3.2	Differential-Scanning-Calorimetrie (DSC)	.202
8.2.3.3	Thermomechanische Analyse (TMA)	.204
8.2.4	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)	.205
8.2.5	Thermogravimetrie (TGA)	.206
9	Elektrische Eigenschaften	.207
9.1	Dielektrisches Verhalten	.207
9.1.1	Dielektrizitätszahl	.207
9.1.2	Mechanismen der dielektrischen Polarisation	.209
9.1.3	Dielektrische Verlustzahl	.212
9.1.4	Praktischer Einsatz	.214
9.2	Elektrisch-mechanische Analogie	.215
9.3	Elektrische Leitfähigkeit	.216
9.3.1	Elektrischer Widerstand	.216
9.3.2	Physikalische Ursachen der Volumenleitfähigkeit	.217
9.4	Anwendungsprobleme	.219
9.4.1	Elektrischer Durchschlag	.219
9.4.2	Die elektrostatische Aufladung	.222
9.4.3	Elektrete	.223
9.4.4	Abschirmung gegen Störfelder	.223

9.5 Magnetische Eigenschaften	224
9.5.1 Magnetisierbarkeit	224
9.5.2 Magnetische Resonanz	224
10 Optische Eigenschaften	226
10.1 Allgemeines	226
10.2 Wellenlängenabhängigkeit der Brechungszahl (Dispersion des Lichtes)	227
10.3 Absorption, Reflexion und Transmission	228
10.3.1 Strahlungsgesetze	228
10.3.2 Infrarotspektroskopie	235
10.4 Doppelbrechung	236
10.5 Glanz und Trübung	238
10.6 Farbmessung	240
10.7 Lichtstreuung in Mehrphasenkunststoffen	242
10.8 Aufheizung mit Infrarotstrahlung und berührungslose Temperaturmessung mit Hilfe der Eigenstrahlung von Kunststoffoberflächen	242
10.8.1 Aufheizung	242
10.8.2 Berührungslose Temperaturmessung von Kunststoffoberflächen	244
11 Akustische Eigenschaften	245
11.1 Grundlagen	245
11.2 Schalldämmung und Schalldämpfung	248
11.2.1 Schalldämmung (Schallreflexion)	248
11.2.2 Schalldämpfung (Schallabsorption)	249
12 Lösungen und Mischungen	251
12.1 Polymerlösungen	252
12.2 Polymergemische	256
12.3 Oberflächenspannung (Oberflächenenergie)	258
12.3.1 Messung	258
13 Stofftransportvorgänge (Sorption, Diffusion, Desorption und Permeation)	264
13.1 Einführung	264
13.2 Löslichkeit von Gasen und Dämpfen in Polymerwerkstoffen	268
13.3 Diffusion von Gasen in Polymerwerkstoffen	268
13.4 Permeation von Dämpfen durch Kunststoffe	270
13.5 Diffusion von Flüssigkeiten durch Kunststoffe am Beispiel von Wasser	273
13.6 Das mechanische Tragverhalten unter physikalischer Einwirkung von spannungsrißerzeugenden Umgebungsmedien	273
13.7 Diffusion von Polymermolekülen und Selbstdiffusion	278

14 Der chemische Abbau von Polymeren	279
14.1 Thermodynamik von Abbaureaktionen	279
14.2 Abbaumechanismen.	279
14.3 Einwirkungen von Chemikalien	280
14.3.1 Allgemeines	280
14.3.2 Beständigkeit gegen Chemikalieneinwirkung.	281
14.3.3 Zersetzungsmechanismen bei PVC.	284
14.3.4 Stabilisierung	286
14.4 Wirkung elektromagnetischer und Korpuskularstrahlung	287
14.4.1 Lichteinwirkung	287
14.4.2 Andere Strahlungsformen.	288
14.4.3 Änderung der Struktur und der Eigenschaften.	288
14.4.4 Witterungseinflüsse.	290
14.5 Biologische Einwirkung	291
14.6 Thermischer Abbau und Brand	292
14.6.1 Brennbarkeit	292
14.6.2 Verbesserung des Brandverhaltens.	293
14.6.3 Recycling	294
15 Physiologische Wirkung (Wirkung auf den Menschen).	295
16 Weiterführende Literatur.	296
16.1 Leichtverständliche Einführung in die Kunststofftechnik.	296
16.2 Sammelwerke, Lehr- und Fachbücher.	296
16.3 Kunststofftechnische Wörterbücher und Lexika	299
16.4 Normen, Richtlinien, Merkblätter.	299
16.5 Dissertationen der RWTH Aachen mit kunststoff-werkstoffkundlichem Bezug	301
Sachverzeichnis	305
Anlage: Vom Schmelzindex zur Viskositätsfunktion	