

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	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 Ppropfpolymerisate. . . . .	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 (Nebenvalenzkräfte/Sekundärbindungen)....	62
4.2.1	Dispersionskräfte. . . . .	62
4.2.2	Dipolkräfte. . . . .	63
4.2.3	Wasserstoffbrückenbindungen. . . . .	63
4.2.4	Vergleich der verschiedenen Nebenvalenzkräfte. . . . .	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 Copolymer. . . . .	85
4.4.1.2	Teilkristalline Copolymer am Beispiel von Copolymeren aus PE und PP. . . . .	86
4.4.1.3	Besondere Copolymer. . . . .	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	Produkteigenschaftsverbessemde 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 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	Nebenvalenzgele . . . . .	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 Festigkeitsrechnung . . . . .	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 kurzfaser verstärkten 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 $\epsilon_r$ . . . . .	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 Zisman . . . . .	370
12.3.2	Methode nach Fowkes . . . . .	371
12.4	Charakterisierung der Oberflächenspannung von Festkörpern . . . . .	372
12.4.1	Die Methode des liegenden Tropfens . . . . .	372
12.4.2	Die M/V/e/my-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 Nebenvalenzkräfte . . . . .	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.....	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