

Inhalt

Vorwort	V
Abkürzungen	XII
I Polymere Werkstoffe	1
1 Einleitung	1
1.1 Die Bedeutung polymerer Werkstoffe	1
1.2 Polymerforschung als Werkstoffwissenschaft	3
1.3 Modifizierungsmöglichkeiten von Polymeren	5
2 Überblick über das mechanische Verhalten von Polymeren	8
2.1 Grundtypen des mechanischen Verhaltens	8
2.2 Abhängigkeiten von grundlegenden Materialkenngrößen	11
2.3 Charakterisierung des mechanischen Verhaltens	15
II Überblick über die Morphologie und die mikromechanischen Prozesse	19
3 Methoden zur Untersuchung von Morphologie und mikromechanischen Prozessen	19
3.1 Methoden zur Untersuchung der Morphologie	19
3.1.1 Lichtmikroskopische Methoden	20
3.1.2 Elektronenmikroskopische Methoden	20
3.1.3 Weitere Methoden	38
3.2 Erfassung von mikromechanischen Prozessen	39
3.2.1 Elektronenmikroskopische Methoden	39
3.2.2 Weitere Methoden	46
3.3 Elektronenmikroskopische Techniken	49
3.3.1 Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie	49
3.3.2 Oberflächen-Direktabbildungsverfahren	52
4 Molekulare und übermolekulare Strukturen	57
4.1 Strukturelle Grundformen der Makromoleküle	57
4.1.1 Struktur der Makromoleküle (Konstitution und Konfiguration)	57
4.1.2 Gestalt der Makromoleküle (Konformation)	59
4.1.3 Zusammenlagerungen und Wechselwirkungen der Makromoleküle	60
4.2 Übermolekulare Strukturen	61
4.2.1 Amorphe Strukturen	61
4.2.2 Teilkristalline Polymere	66
4.2.3 Polymerkompositionen	68
5 Mikromechanische Prozesse von Deformation und Bruch	72
5.1 Grundtypen der Deformation	72
5.2 Zähigkeitssteigernde Mechanismen	75
5.3 Bruchprozesse	77
5.3.1 Mikrorißbildung	77
5.3.2 Rißausbreitung	81
5.3.3 Bruchstrukturen	83

6 Allgemeine Charakterisierung von Crazes und crazeartigen Deformationszonen	88
6.1 Das Phänomen „Craze“	88
6.2 Merkmale der Crazes	90
6.2.1 Grundtyp der Crazes	90
6.2.2 Variationen der Crazestruktur	94
6.2.3 Zur Terminologie der Crazes	98
6.2.4 Verbindung zum Bruchverhalten der Kunststoffe und die zwei Aspekte der Crazes	99
6.3 Einflußfaktoren für Crazebildung und Crazewachstum	103
6.3.1 Crazeeinleitung und Crazewachstum	103
6.3.2 Äußere Einflußfaktoren	104
6.3.3 Innere Einflußfaktoren	105
6.4 Kriterien und Theorien von Crazeeinleitung und Crazewachstum	107
6.4.1 Kriterien zur Crazeeinleitung	107
6.4.2 Hypothesen und Theorien der Crazeeinleitung	109
6.4.3 Hypothesen und Theorien des Crazewachstums	112
6.4.4 Beziehungen zum molekularen Größenniveau	114
6.5 Mechanismen der Crazebildung	120
6.5.1 Crazeeinleitung	120
a) Bildung der Vorcrazes	120
b) Umwandlung in den entwickelten, fibrillierten Craze	123
c) Polymerspezifische Unterschiede	126
d) Einfluß einer Temperatur unterhalb T_g	126
6.5.2 Längenwachstum (Crazespitzenfortschreiten)	129
6.5.3 Dickenwachstum	130
6.5.4 Strukturell initiierte Crazes	132

III Beschreibung einzelner Polymere 140

7 Amorphe Polymere	140
7.1 Zur übermolekularen Struktur der amorphen Polymere	141
7.1.1 Amorphe, einphasige Kunststoffe	141
7.1.2 Amorphe, mehrphasige Kunststoffe	142
7.2 Polystyrol (PS)	142
7.2.1 Quantitative Darstellung der Crazestruktur	142
a) Crazeprofil	142
b) Crazespitzen	144
c) Innenstruktur der Crazes	144
d) Dehnung in den Crazes	148
7.2.2 Wachstum und Reißen der Crazes	150
7.2.3 Beeinflussungen der Crazebildung	152
a) Einfluß einer Probenorientierung	152
b) Einfluß einer Probenentperung	154
c) Einfluß energiereicher Bestrahlung	155
d) Einfluß der Umgebung	156
e) Weitere Beeinflussungen	157
7.3 Polymethylmethacrylat (PMMA)	157
7.4 Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)	161
7.4.1 Grundeffekte	161

7.4.2	Beeinflussungen der Crazebildung	164
	a) Einfluß einer Temperatur	164
	b) Einfluß energiereicher Bestrahlung	166
7.4.3	Analogien zu SAN	166
7.5	Polyvinylchlorid (PVC)	167
7.6	Polycarbonat (PC)	170
7.7	Weitere amorphe Polymere	174
7.8	Vergleich der Crazes in verschiedenen amorphen Kunststoffen	175
7.8.1	Struktur der Crazes	175
7.8.2	Zum Phänomen der Innen crazes	177
7.8.3	Beziehungen zur Zähigkeit	178
8	Teilkristalline Polymere	185
8.1	Überblick über die Morphologie	185
8.1.1	Strukturvielfalt	185
8.1.2	Gestalt und Struktur der Lamellen	188
8.1.3	Beeinflussungen der Morphologie	192
8.2	Überblick über das Deformationsverhalten	192
8.2.1	Sprödartige Versagensmechanismen	193
8.2.2	Duktiles Versagen	196
8.3	Crazes in teilkristallinen Polymeren	204
8.3.1	Crazing bei tiefen Temperaturen	204
8.3.2	Umgebungs-Crazing	205
8.3.3	Crazing beim sprödartigen Bruch bei Raumtemperatur	209
8.3.4	Crazing beim plastischen Bruch	211
8.4	Deformationsprozesse in verschiedenen teilkristallinen Polymeren	212
8.4.1	Polyethylene	212
	a) Einfluß des Molekulargewichtes	212
	b) Einfluß des Verzweigungsgrades	218
8.4.2	Polypropylen	221
8.4.3	Weitere teilkristalline Polymere	222
8.5	Hochfeste Materialien	224
8.5.1	Grenzen einer Eigenverstärkung	224
8.5.2	Orientierung von schmelzekristallisiertem Material	225
8.5.3	Orientierte Fäden durch Lösungs- oder Gelspinnen	229
9	Polymerkombinationen	236
9.1	Überblick über die Morphologie von Polymerkombinationen	236
9.1.1	Kautschukmodifizierte Thermoplaste	236
9.1.2	Polymerblends	239
9.2	Kautschukmodifizierte, schlagzähe Polymersysteme	241
9.2.1	Klassische, schlagzähe Polymere (PS-sz, ABS)	242
	a) Herstellung	242
	b) Grundeffekte	242
	c) Matrixeinfluß	251
	d) Kautschukvolumenanteil	252
	e) Kautschukteilchenmodul	257
	f) Pfropfgradeinfluß	261
	g) Teilchengrößeneinfluß	262
	h) Gestalt und Innenstruktur der Kautschukteilchen	266
	i) Belastungsbedingungen	268

j) Weitere Systeme und spezielle Effekte	269
k) Alternative Zähigkeitsmodelle	270
9.2.2 Weitere kautschukmodifizierte Dispersysteme	271
a) Kautschukmodifizierte, amorphe Thermoplaste	271
b) Kautschukmodifiziertes PP	272
c) Kautschukmodifiziertes PA	272
d) Kautschukmodifizierte Epoxidharze	276
9.2.3 Schlagzähe Polymere mit wabenartiger Kautschukanordnung („Wabensysteme“)	277
a) Energieabsorptionsmechanismus	277
b) Verarbeitungseinfluß	281
c) Alterungsverhalten	284
d) Verschiedene weitere Wabensysteme	284
9.2.4 Allgemeingültige Prinzipien einer Schlagzähigkeitserhöhung	286
9.3 Thermoplast/Thermoplast-Kombinationen	287
9.3.1 Einfluß der Verträglichkeit	287
9.3.2 Mischungen aus amorphen Polymeren	289
9.3.3 Mischungen aus amorphen und teilkristallinen Polymeren	292
9.3.4 Mischungen teilkristalliner Polymere miteinander	297
9.4 Theoretische Analysen zum Einfluß der Morphologie auf die Zähigkeit	298
9.4.1 Elastizitätstheoretische Spannungskonzentrationen an und in Einzelteilchen	298
9.4.2 Überlagerung der Spannungsfelder benachbarter Teilchen	303
9.4.3 Energetische Effekte	305
9.4.4 Konsequenzen aus den theoretischen Befunden	307
a) Rolle der Teilchengröße	307
b) Rolle des Teilchenabstandes	309
10 Teilchengefüllte Polymere	320
10.1 Morphologie gefüllter Thermoplaste	320
10.2 Mikromechanische Grundeffekte	323
10.2.1 Elastizitätstheoretische Ergebnisse	323
10.2.2 Deformationseffekte bei weitgehend fehlender Grenzflächenhaftung	324
10.2.3 Verhalten von Systemen mit starker Phasenhaftung	329
10.2.4 Ternäre Polymere	331
10.3 Zähigkeitseffekte	332
10.3.1 Vergleich mit kautschukmodifizierten Kunststoffen	332
10.3.2 Crazeartige Deformationen	333
a) Struktur der crazeartigen Zonen	333
b) Einfluß des Teilchenabstandes	335
c) Einfluß der Matrixduktilität	340
10.4 Polymerspezifische Effekte	341
11 Faserverstärkte Polymere	345
11.1 Überblick über die Stoffklasse	345
11.2 Mikromechanische Grundeffekte	347
11.2.1 Strukturelle Besonderheiten	347
11.2.2 Festigkeit und Bruchverhalten	348
11.3 Möglichkeiten zur Steigerung der Zähigkeit	352

11.3.1	Energiedissipative Mechanismen	352
11.3.2	Experimentelle Ergebnisse	354
11.4	Weitere (materialabhängige) Besonderheiten	358
12	Weitere Polymere	363
12.1	Duroplaste	363
12.1.1	Harzmaterial	363
12.1.2	Kautschukmodifizierte Epoxidharze	365
12.2	Polymere und Umweltaspekte	369
12.2.1	Polymere aus dem Recycling	370
12.2.2	Biologisch abbaubare Kunststoffe	371
12.3	Verschiedenes	373
12.3.1	Mikroporöse Materialien	373
12.3.2	Kombinationen mit anorganischen Werkstoffen	374
Sachregister	378