

Makromoleküle

Band 4 **Anwendungen von Polymeren**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

Hans-Georg Elias
Michigan Molecular Institute

 **WILEY-VCH**

Inhaltsverzeichnis

Weiterführende Literatur und Quellennachweise befinden sich jeweils am Kapitelende.

Motto	V
Vorworte	VII
Verzeichnis der Abkürzungen	X
Mathematische Symbole	X
Symbole um Buchstaben	XI
Präfixes von Worten	XIV
Andere Abkürzungen	XIV
Symbole für physikalische Größen	XV
Inhaltsverzeichnis	XXII

1. Einleitung	1
---------------------	---

Grundlagen

2. Polymere	4
2.1. Chemische Strukturen	4
2.1.1. Konstitution	4
Strukturbezogene Begriffe	4
Verfahrensbezogene Begriffe	5
Molekulargewichte	8
2.1.2. Konfiguration	9
2.2. Physikalische Strukturen	11
2.2.1 Konformation	11
2.2.2 Morphologie	12
3. Hilfsstoffe	17
3.1. Übersicht	17
3.1.1. Einteilung	17
3.1.2. Aufbereiten von Polymeren	19
3.1.3 Entgasen von Polymeren	21
3.1.4 Auswandern von Hilfsmitteln	21
Terminologie	21
Prozesse	22
Eigenschaften	23
3.2. Farbmittel	24
3.2.1. Einleitung	24
3.2.2 Farbstoffe	25
3.2.3 Pigmente	26
3.2.4 Eigenschaften	27

3.3.	Additive für physikalische Gebrauchseigenschaften	28
3.3.1	Nukleierungsmittel	28
3.3.2	Füllstoffe	30
	Übersicht	30
	Geometrische Eigenschaften	33
	Sphäroidale Füllstoffe	34
	Faserförmige Füllstoffe	36
	Plättchenförmige Füllstoffe	37
	Fluide Füllstoffe	38
3.3.3.	Haftvermittler	38
	Nichtreaktive Haftvermittler	38
	Reaktive Haftvermittler	39
3.3.4.	Weichmacher	40
	Übersicht	40
	Weichmacher-Typen	41
	PVC-Plastisole	42
3.3.5.	Phasenvermittler	42
3.3.6	Antibeschlagmittel	43
3.3.7.	Antistatika und Leitfähigkeitsverbesserer	43
3.4.	Verarbeitungshilfen	45
3.4.1.	Gleitmittel	45
	Innere Gleitmittel	45
	Äussere Gleitmittel	46
3.4.2.	Plastifiziermittel	47
3.4.3.	Trennmittel	47
3.4.4.	Antiblockmittel	47
3.5.	Chemisch wirkende Hilfsmittel	48
3.5.1.	Alterung	48
3.5.2.	Abbau	49
	Kettenspaltungen	49
	Depolymerisationen	50
	Pyrolysen	50
3.5.3.	Wärmestabilisation	51
3.5.4.	Oxidation	53
	Prozesse	53
	Antioxidantien	55
3.5.5.	Lichtschutz	60
	Grundlagen	60
	Prozesse	61
	Lichtschutzmittel	64
3.5.6.	Flammschutz	66
	Verbrennung	66
	Sauerstoffindex	67
	Temperaturbeständige Polymere	70
	Flammschutzmittel	70
3.5.7.	Biozide	72

4. Verarbeitung	77
4.1. Einleitung	77
4.1.1. Übersicht	77
4.1.2. Allgemeine Faktoren	78
Dichten	78
Entgasen	80
Feuchteaufnahme	80
Konditionieren	81
Lagern und Fördern	81
Kühlen und Tempern	82
4.2. Fließeigenschaften	84
4.2.1. Einführung	84
4.2.2. Viskosimetrie und Rheometrie	85
4.2.3. Stationäre Scherviskositäten	88
Abhängigkeit von der Molmasse	88
Einfluss der Temperatur	90
4.2.4. Nichtstationäre Scherviskositäten	90
Grundbegriffe	90
Fliesskurven	91
4.2.5. Schmelze-Elastizität	94
4.2.6. Dehnviskosität	96
Phänomene	97
Einfluss der Polymerstruktur	98
Festigkeit von Schmelzen	100
4.3. Prozesse	101
4.3.1. Verarbeitungsgruppen	101
4.3.2. Energieaufwand	102
4.4. Verarbeitung über den viskosen Zustand	103
4.4.1. Giessverfahren	103
4.4.2. Auftrageverfahren	105
Streichverfahren	105
Walzverfahren	106
Sprühverfahren	106
Laminierverfahren	107
4.4.3. Formverfahren	108
4.4.4. Pressverfahren	110
4.5. Ausstossverfahren	112
4.5.1. Plastifizierverfahren	112
4.5.2. Extrudieren	114
4.5.3. Spritzgiessen	117
4.6. Formen	119
4.6.1. Kaltformen	120
4.6.2. Warmformen	121
4.7. Bearbeitungsverfahren	122
4.7.1. Umformen	122

4.7.2. Trennverfahren	123
4.7.3. Fügeverfahren	123
4.8. Veredlungsverfahren	125
5. Prüfung	130
5.1. Einleitung	130
5.1.1. Übersicht	130
5.1.2. Normen	132
5.2. Thermische Eigenschaften	134
5.2.1. Thermische Ausdehnung	134
5.2.2. Thermische Umwandlungen und Relaxationen	135
5.3. Zugversuche	137
5.3.1. Phänomene	137
Spannungs-Dehnungs-Diagramme	137
Klassifizierungen von Kunststoffen	139
5.3.2. Elastizitätsmoduln	140
5.3.3. Biegemoduln	141
5.3.4. Zugfestigkeit	142
Formen des Versagens	142
Einfluss der Struktur	143
Statistische Effekte	145
5.4. Schlagzähigkeiten	146
5.5. Härte	149
5.6. Zeit- und Dauerfestigkeiten	151

Grundanwendungen

6. Fasern, Fäden und Gewebe	154
6.1. Einleitung	154
6.1.1. Einteilung	154
6.1.2. Geschichte und Produktion	155
6.1.3. Bezeichnungen	160
Dimensionen von Fasern	160
Filamente und Stapelfasern	161
6.2. Herstellung von Fasern und Fäden	163
6.2.1. Übersicht	163
6.2.2. Spinnverfahren	164
Schmelzspinnen	164
Trockenspinnen	165
Nassspinnen	166
Gelspinnen	167
Dispersionsspinnen	167
Spezialverfahren	167
6.2.3. Faserquerschnitte	168
6.2.4. Spinnbarkeit	170

6.2.5.	Fliessprozesse	171
6.2.6.	Faserstruktur	172
	Erspinnen	172
	Verstrecken	173
6.3.	Textilfasern	175
6.3.1.	Einleitung	175
	Übersicht	175
	Eigenschaften	177
	Textile Kette	180
6.3.2.	Seide-Typen	181
	Übersicht	181
	Naturseide	182
	Polyamide	184
	Polyester, Seide-Typen	185
	Seidenähnliche Fasern	187
6.3.3.	Baumwoll-Typen	188
	Baumwolle	188
	Viscosefasern	190
	Polyester, Baumwoll-Typen	192
	Flachs und Ramie	193
6.3.4.	Woll-Typen	195
	Natürliche Wollen	195
	Acrylfasern	200
	Polyester, Wolltypen	202
	Andere wollähnliche Fasern	202
6.3.5.	Elastofasern	202
	Typen	202
	Gummifäden	203
	Elastan-Fasern	203
6.4.	Textilien	204
6.4.1.	Garne	204
6.4.2.	Gewebe und Gewirke	207
	Gewebe	207
	Gewirke	208
6.4.3.	Textilverbundstoffe	209
6.5.	Textilveredlung	211
6.5.1.	Übersicht	211
6.5.2.	Appretur	212
6.5.3.	Hochveredlung	212
6.5.4.	Färben	214
6.5.5.	Andere Ausrüstungen	215
6.6.	Industriefasern	216
6.6.1.	Einführung	216
6.6.2.	Bast- und Hartfasern	218
	Bastfasern	218
	Hartfasern	219

6.6.3.	Haarfasern	219
6.6.4.	Flach-, Splitter- und Spaltfäden	219
6.6.5.	Olefin- und Vinyl-Fasern	221
6.6.6.	Aramid-Fasern	223
6.6.7.	Polybenzoxazole und Polybenzthiazole	225
6.6.8.	Glasfasern	226
6.6.9.	Andere anorganische Fasern	229
6.7.	Kohlenstoff-Fasern	230
6.7.	Papiere	231
6.7.1.	Einführung	231
6.7.2.	Cellulosepapiere	232
6.7.3.	Pergamentpapier	233
6.7.4.	Vulkanfiber	234
6.7.5.	Synthetische Papiere	234
6.7.6.	Kunststoffpapiere	234
6.8.	Leder	235
6.8.1.	Naturleder	235
	Häute und Felle	235
	Kollagen	236
	Eigenschaften	237
	Gerben	237
6.8.2.	Synthetische Leder	237
7.	Kautschuk und Elastomere	244
7.1.	Übersicht	244
7.1.1.	Einleitung	244
7.1.2.	Geschichtliche Entwicklung	244
7.1.3.	Klassifikationen	249
7.1.4.	Wirtschaftliche Bedeutung	250
7.2.	Rohkautschuk	252
7.2.1.	Rohfestigkeiten	252
7.2.2.	Autohäsion	253
7.2.3.	Mastikation und Formulierung	255
	Kautschukverschnitte	255
	Formulierung	256
7.2.4.	Vulkanisation	259
	Heissvulkanisation	259
	Kaltvulkanisation	261
	Vernetzung mit Peroxiden	261
	Andere Dienvulkanisationen	262
	Dynamische Vulkanisation	262
	Vernetzungsdichte	262
7.3.	Allzweckkautschuk	262
7.3.1.	Naturkautschuk	263
	Rohkautschuk	263
	Eigenschaften des Rohkautschuks	264

7.3.2. Vulkanisierter Naturkautschuk	264
7.3.2. Synthetische <i>cis</i> -1,4-Poly(isoprene)	265
7.3.3. Balata und Guttapercha	265
7.3.4. Butadien-Kautschuke	265
7.3.5. Styrol-Butadien-Kautschuke	267
Typen	267
Autoreifen	268
7.3.6. Ethylen-Propylen-Kautschuke	270
7.3.7. Pulverkautschuke	270
7.4. Spezialkautschuke	271
7.4.1. Öl- und temperaturbeständige Kautschuke	271
7.4.2. Ozon- und sauerstoffbeständige Kautschuke	274
7.4.3. Butyl-Kautschuk	275
7.4.4. Flüssigkautschuke	276
7.5. Thermoplastische Elastomere	277
7.5.1. Übersicht	277
7.5.2. Styrol-Dien-TPE	279
7.5.3. Thermoplastische Olefin-Elastomere	283
7.5.4. Andere thermoplastische Elastomere	284
7.6. Flüssigkristalline Elastomere	284
7.7. Altgummi-Aufbereitung	285
8. Kunststoffe	290
8.1. Einführung	290
8.1.1. Klassen	290
8.1.2. Geschichtliche Entwicklung	295
8.1.3. Einteilung von Kunststoffen	296
8.1.4. Nomenklatur und Klassifizierungen	299
8.1.5. Wirtschaftliche Bedeutung	301
8.2. Standard-Thermoplaste	306
8.2.1. Poly(1-olefin)e	307
Poly(ethylen)e	307
Ethen-Copolymere	309
Poly(propylen)	309
Andere Poly(1-olefin)e	310
8.2.2. Styrolpolymere	310
Poly(styrol)	310
Copolymere	311
8.2.3. Vinylpolymere	313
8.3. Technische Thermoplaste	314
8.3.1. Styrol-Pfropfcopolymere	315
8.3.2. Polycarbonate und Polyester	316
8.3.3. Polyamide	318
8.3.4. Polyacetale	319
8.3.5. Poly(methylmethacrylat)	319
8.4. Hochleistungs-Thermoplaste	320

8.4.1.	Teilaromatische Polyamide	320
8.4.2.	Polyimide	321
8.4.3.	Poly(<i>p</i> -phenylensulfid)	322
8.4.4.	Polyarylenethersulfone	323
8.4.5.	Polyarylenetherketone	323
8.4.6.	Syndiotaktisches Poly(styrol)	324
8.4.7.	Fluorierte Thermoplaste	324
8.4.8.	LCP-Gläser	326
8.5.	Duroplaste	329
8.5.1.	Übersicht	329
8.5.2.	Härtung	329
8.5.3.	Polykondensations-Duroplaste	331
8.5.4.	Polyadditions-Duroplaste	332
	Epoxid-Harze	332
	Polyurethane	333
	RIM-Verfahren	334
8.5.5.	Polymerisations-Duroplaste	335
	Allylpolymer	336
	Ungesättigte Polyester	335
	Vinylester-Harze	336
8.6.	Entsorgung	337
8.6.1.	Einleitung	337
8.6.2.	Natürlicher Abbau	338
8.6.3.	Stoffliches Recycling	338
8.6.4.	Thermisches Aufbereiten	340
8.6.5.	Verbrennung	340
8.6.6.	Deponierung	342
8.6.7.	Ersatz von Kunststoffen	342
9.	Gefüllte und verstärkte Kunststoffe	350
9.1.	Polymer-Systeme	350
9.1.1.	Definitionen	350
9.1.2.	Historische Entwicklung	353
9.2.	Mischungsregeln	354
9.2.1.	Moduln	354
9.2.2.	Dichten	357
9.2.3.	Zwischenschichten	358
9.3.	Elastizitätsmoduln	361
9.3.1.	Langfasern	361
9.3.2.	Kurzfasern	365
	Cox-Gleichung	365
	Halpin-Tsai-Gleichung	366
9.3.3.	Partikel	368
9.4.	Festigkeiten	372
9.4.1.	Phänomene	372
9.4.2.	Reissfestigkeit faserverstärkter Polymerer	375

Langfasern	375																																
Kurzfasern	377																																
Zeitstandfestigkeiten	379																																
9.4.3. Reissfestigkeiten gefüllter Polymerer	380																																
9.4.4. Einreissfestigkeiten	382																																
9.4.5. Schlagzähigkeiten	384																																
9.5. Dehnungen und thermische Eigenschaften	385																																
9.5.1. Reissdehnungen	385																																
9.5.2. Ausdehnungskoeffizienten	386																																
9.5.3. Übergangstemperaturen	387																																
9.5.4. Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten	390																																
9.6. Rheologische Eigenschaften	390																																
Historische Notizen	391																																
10. Polymermischungen	394																																
10.1. Übersicht	394																																
10.1.1. Terminologie	394																																
10.1.2. Stoffzustände	396																																
10.2. Mischbarkeit	397																																
10.2.1. Einführung	397																																
10.2.2. Parameter	399																																
10.2.3. Phasendiagramme flüider Systeme	403																																
10.2.4. Phasendiagramme mit festen Phasen	405																																
10.3. Weichgemachte Polymere	407																																
10.3.1. Einleitung	407																																
10.3.2. Molekulare Weichmacherwirksamkeit	407																																
10.3.3. Technische Weichmacherwirksamkeit	409																																
10.4. Polymergemische	411																																
10.4.1. Einleitung	411																																
10.4.2. Herstellung von Polymergemischen	412	Mechanische Mischungen	412	<i>In situ</i> Polymerisationen	415	10.4.3. Untersuchung von Polymergemischen	417	10.4.4. Phasenmorphologie	421	10.4.5. Elastomer-Verschnitte	422	10.4.6. Polymerblends	423	Mischungsregeln	423	Zwei amorphe Polymere	425	Ein amorphes und ein kristallines Polymeres	428	Modelle	432	Phasenvermittler	433	Zwei kristalline Polymere	436	Molekulare Verbundstoffe	437	10.4.7. Kautschukmodifizierte Kunststoffe	439	Herstellung	440	Deformationsprozesse	442
Mechanische Mischungen	412																																
<i>In situ</i> Polymerisationen	415																																
10.4.3. Untersuchung von Polymergemischen	417																																
10.4.4. Phasenmorphologie	421																																
10.4.5. Elastomer-Verschnitte	422																																
10.4.6. Polymerblends	423	Mischungsregeln	423	Zwei amorphe Polymere	425	Ein amorphes und ein kristallines Polymeres	428	Modelle	432	Phasenvermittler	433	Zwei kristalline Polymere	436	Molekulare Verbundstoffe	437	10.4.7. Kautschukmodifizierte Kunststoffe	439	Herstellung	440	Deformationsprozesse	442												
Mischungsregeln	423																																
Zwei amorphe Polymere	425																																
Ein amorphes und ein kristallines Polymeres	428																																
Modelle	432																																
Phasenvermittler	433																																
Zwei kristalline Polymere	436																																
Molekulare Verbundstoffe	437																																
10.4.7. Kautschukmodifizierte Kunststoffe	439																																
Herstellung	440																																
Deformationsprozesse	442																																

Deformationsmechanismen	443
10.5. Schaumstoffe	446
10.5.1. Übersicht	446
10.5.2. Herstellung	447
Physikalische Verfahren	447
Chemische Schaumstofferzeugung	449
10.5.3. Eigenschaften von Schaumstoffen	451
Mechanische Eigenschaften	451
Wärmeleitfähigkeiten	452
 Spezielle Anwendungen	
11. Packstoffe und Packmittel	458
11.1. Übersicht	458
11.2. Permeation	459
11.2.1. Grundlagen	459
11.2.2. Permeation von Gasen	462
11.2.3. Diffusion von Flüssigkeiten	466
11.2.4. Migration von Additiven	468
11.3. Anwendungen	469
11.3.1. Folien und Filme	470
11.3.2. Verbundfolien	473
11.3.3. Behälter und Flaschen	475
12. Polymere in der Elektro- und Elektronik-Industrie	479
12.1. Einleitung	479
12.1.1. Übersicht	479
12.1.2. Einteilung	479
12.1.3. Elektrische Messwerte	480
12.1.4. Prüfwesen	481
12.2. Isolatoren	481
12.2.1. Polarisierbarkeit	482
12.2.2. Relative Permittivität	483
12.2.3. Durchgangswiderstände	485
12.2.4. Oberflächenwiderstände	486
12.2.5. Dielektrische Verlustfaktoren	486
Grundlagen	486
Komplexe Permittivität	487
Dielektrische Spektroskopie	489
Konstitutionseinflüsse	491
12.2.6. Durchschlagfeldstärke und Kriechstromfestigkeit	492
12.2.7. Elektrostatische Aufladung	493
12.2.8. Elektrophotographie	495
12.2.9. Elektrete	496
12.2.10. Pyro-, Piezo- und Ferroelektrika	497

12.2.11. Photoresists	498
12.3. Elektrische Leiter	500
12.3.1. Elektrische Leitfähigkeit	500
12.3.2. Elektrisch leitfähige Polymere	502
12.3.3. Dotierung	504
12.3.4. Polaronen und Solitonen	505
12.3.5. Organische Metalle	507
13. Polymere in der Optik und Optoelektronik	513
13.1. Lichtbrechung	513
13.1.1. Brechungsindices	513
13.1.2. Lichtbeugung	515
13.1.3. Glanz	516
13.1.4. Lichtdurchlässigkeit	516
Ideale Transmission	517
Äussere Transmission	518
Transparenz und Transluzenz	518
Schleier	519
Transparenz von Kunststoffen	519
Kontaktlinsen	521
13.1.5. Lichtleitung	522
13.1.6. Optische Doppelbrechung	523
13.1.7. Irisdeszenz	523
13.2. Lichtstreuung	524
13.2.1. Phänomene	524
13.2.2. Opazität	525
13.2.3. Deckvermögen von Anstrichstoffen	527
13.3. Optoelektronik und Photonik	528
13.3.1. Einführung	528
13.3.2. Grundlagen	529
13.3.3. NLOs 2. Ordnung	532
13.3.4. NLOs 3. Ordnung	534
13.4. Farbe	536
13.4.1. Einführung	534
13.4.2. Munsell-System	536
13.4.3. CIE-System	538
14. Lösungen und Gele	542
14.1. Übersicht	542
14.2. Löslichkeit	543
14.3. Viskosität	546
14.3.1. Einleitung	546
14.3.2. Kugeln	546
14.3.3. Knäuelmoleküle in verdünnten Lösungen	548
14.3.4. Knäuel in konzentrierteren Lösungen	550
14.3.5. Wurmartige und steife Makromoleküle	552

14.3.6. Assoziierende Makromoleküle	553
Intra- und intermolekulare Assoziationen	553
Offene und geschlossene Assoziationen	555
Viskositäten assoziierender Systeme	557
14.3.7. Polyelektrolyte	559
14.3.8. Nicht-Newtonische Lösungen	561
14.3.9. Lyotrope Flüssigkristalle	562
14.4. Lösungen	563
14.4.1. Erdölgewinnung	563
14.4.2. Strömungsbeschleuniger	564
14.4.3. Viskositätsverbesserer	566
Fliesspunkt	566
Viskositätserhöhung	566
VI-Index-Verbesserer	567
14.5. Polymerdispersionen	571
14.5.1. Übersicht	571
14.5.2. Stabilisierung	572
14.5.3. Flockung	573
14.6. Gele	575
14.6.1. Einführung	575
14.6.2. Chemisch vernetzte Gele	576
Substanzen	576
Eigenschaften	577
14.6.3. Physikalisch vernetzte Gele	578
Gelierungen	578
Eigenschaften	580
15. Überzüge und Klebstoffe	585
15.1. Einleitung	585
15.2. Polymere an und in Oberflächen	585
15.2.1. Polymeroberflächen	586
15.2.2. Adsorption	586
15.2.3. Benetzung	588
15.3. Klebstoffe	591
15.3.1. Übersicht	591
15.3.2. Adhäsion	593
15.3.3. Klebstoff-Typen	595
15.3.4. Klebung	597
15.4. Anstrichmittel	598
15.4.1. Übersicht	598
15.4.2. Aufbau von Anstrichmitteln	600
Zusammensetzung	600
Kritische Pigmentkonzentration	602
Filmbildung und Haftung	604
15.4.3. Lösungsmittellacke	606
15.4.4. Wasserlacke	607

15.4.5. Latexanstriche	607
15.4.6. Nichtwässrige Dispersionen	610
15.4.7. High Solids	611
15.4.8. Pulverlacke	612
15.5. Druckfarben	613
15.5.1. Druckverfahren	613
Hochdruck	613
Flachdruck	614
Tiefdruck	615
Durchdruck	615
15.5.2. Druckfarben	615
15.6. Depots	616
15.6.1. Mikrokapseln	617
15.6.2. Andere Depots	618
16. Anhang: Einheiten, Symbole, Kurzzeichen	624
16.1. SI-Einheiten	624
Tab. 16-1 Physikalische Grundgrößen und SI-Grundeinheiten	624
Tab. 16-2 Abgeleitete SI-Einheiten für physikalische Größen	625
Tab. 16-3 Neben oder mit SI-Einheiten verwendete ältere Einheiten	626
Tab. 16-4 Vorsatzzeichen für SI-Einheiten im Dezimalsystem	627
Tab. 16-5 Vorsatzzeichen in der Computerindustrie	627
Tab. 16-6 Vorsatzzeichen in der U.S. Finanz- und Gaswirtschaft	628
Tab. 16-7 Römische Zahlenzeichen	628
Tab. 16-8 Fundamentale Konstanten	628
Tab. 16-9 Ausgewählte Umrechnungen in SI-Einheiten	629
16.2. Namen und Kurzzeichen für Fasern	633
Tab. 16-10 Bezeichnungen und Kurzzeichen für Fasern	633
Tab. 16-11 Generische Namen von Textilfasern (FTC)	636
16.3. Kurzzeichen für Elastomere	637
Tab. 16-12 Kurzzeichen für Elastomere	637
16.4. Kurzzeichen für Thermoplaste und Duroplaste	639
Tab. 16-13 Kurzzeichen für auf Monomeren basierende Namen	639
Tab. 16-14 Kurzzeichen für auf Gruppen basierende Namen	642
Tab. 16-15 Kurzzeichen für auf Umwandlungen basierende Polymere	643
Tab. 16-16 Kurzzeichen für Namen von Blends, Formmassen usw.	643
Tab. 16-17 Kurzzeichen für Namen von Monomeren usw.	644
Sachregister	646
Englische Fachausdrücke	676