

Hans-Georg Elias

# Makromoleküle

## **Band 2: Physikalische Strukturen und Eigenschaften**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

 **WILEY-VCH**

Weinheim · New York · Chichester · Brisbane · Singapore · Toronto

## Inhaltsverzeichnis

Weiterführende Literatur und Quellennachweise befinden sich jeweils am Kapitelende.

Motto .....	V
Vorworte .....	VII
Verzeichnis der Abkürzungen .....	IX

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

### Einzelne Makromoleküle

2. Chemische Struktur .....	4
2.1 Konstitution .....	4
2.1.1. Einfache Ketten .....	4
2.1.2. Bezeichnungen einfacher Ketten .....	6
2.1.3. Polymerarchitektur .....	8
Lineare Polymere .....	8
Verzweigte Polymere .....	9
2.1.4. Konstitutionell höherdimensionale Makromoleküle .....	10
2.2. Konfiguration .....	12
2.2.1. Grundbegriffe .....	12
2.2.2. Konfigurationsstatistik .....	13
2.3. Polymerisationsgrade und Molmassen .....	15
2.3.1. Übersicht .....	15
2.3.2. Molekülmassen, Molekulargewichte und Molmassen .....	16
2.3.3. Statistische Gewichte .....	17
2.3.4. Einfache Mittelwerte der Molmassen .....	19
2.3.5. Komplexere Mittelwerte der Molmassen .....	21
Einfache hydrodynamische Mittelwerte .....	21
Zusammengesetzte hydrodynamische Mittelwerte .....	21
2.3.6. Mittelwerte der Polymerisationsgrade .....	23
2.3.7. Mittelwerte anderer Eigenschaften .....	23
2.3.8. Momente .....	24
2.3.9. Molekulare Uneinheitlichkeit .....	25
2.3.10. Konstitutionelle Uneinheitlichkeit .....	25
2.3.11. Bestimmung von Molmassen .....	28
2.4. Verteilungsfunktionen .....	29
2.4.1. Darstellung von Verteilungsfunktionen .....	29
2.4.2. Gauss-Verteilung .....	31
2.4.3. Logarithmische Normalverteilung .....	33
2,4,4. Poisson-Verteilung .....	35
2.4.5. Schulz-Zimm- und Schulz-Flory-Verteilung .....	35

2.4.6.	Generalisierte Exponentialverteilungen .....	36
2.4.7.	Bestimmung von Molmassenverteilungen .....	37
	Historische Notizen .....	38
<b>3.</b>	<b>Mikrokonformationen .....</b>	<b>40</b>
3.1.	Grundlagen .....	40
3.2.	Lokale Konformationen .....	41
3.2.1.	Definitionen .....	41
3.2.2.	Rotationspotentiale .....	42
3.2.3.	Konstitutionseinflüsse .....	44
3.3.	Sequenzen von Mikrokonformationen .....	46
3.3.1.	Einleitung .....	46
3.3.2.	Helices .....	47
3.3.3.	Einfluss der Konstitution und Konfiguration .....	49
3.4.	Optische Aktivität .....	52
3.4.1.	Grundlagen .....	52
	Zirkulardichroismus .....	53
	Optische Aktivität .....	53
	Optische Rotationsdispersion .....	54
3.4.2.	Einfluss der Struktur .....	55
	Poly( $\alpha$ -aminosäure)n und Proteine .....	55
	Poly(1-olefin)e .....	58
	Copolymere .....	59
3.5.	Umwandlungen von Konformationen .....	60
3.5.1.	Phänomene .....	60
3.5.2.	Thermodynamik .....	61
3.5.3.	Kinetik .....	63
	Historische Notizen .....	64
<b>4.</b>	<b>Makrokonformationen .....</b>	<b>66</b>
4.1.	Übersicht .....	66
4.1.1.	Einleitung .....	66
4.1.2.	Konformation in Lösungen .....	67
	Helices in Lösungen .....	68
	Partielle Helices in Lösung .....	68
4.2.	Kompakte Moleküle .....	70
4.2.1.	Einführung .....	70
4.2.2.	Sphäroide .....	71
	Kugeln .....	71
	Ellipsoide .....	73
4.2.3.	Stäbchen .....	73
4.3.	Ungestörte Knäuel linearer Ketten .....	75
4.3.1.	Konturlängen .....	75
4.3.2.	Trägheitsradien .....	77
4.3.3.	Knäueltypen .....	79
4.3.4.	Molekülmodelle .....	80

	Irrflug-Kette .....	80
	Segment-Kette .....	83
	Valenzwinkel-Kette mit freier Drehbarkeit .....	84
	Valenzwinkel-Kette mit behinderter Drehbarkeit .....	85
	RIS-Modell .....	86
4.3.5.	Flexibilität von Ketten .....	89
	Sterischer Faktor (Behinderungssparameter) .....	89
	Charakteristisches Verhältnis .....	90
	Kuhn-Längen .....	91
	Persistenzlänge .....	92
4.3.6.	Trägheitsradien .....	92
4.3.7.	Knäueldichte .....	94
4.3.8.	Verteilung der Fadenendenabstände .....	97
4.3.9.	Wurmartige Ketten .....	98
4.4.	Gestörte Knäuel linearer Ketten .....	101
4.4.1.	Ausgeschlossene Volumina .....	101
4.4.2.	Aufweitungsfaktoren .....	102
4.4.3.	Helicale wurmartige Ketten .....	104
4.4.4.	Einfluss der Molmasse .....	106
4.4.5.	Einfluss der Polymolekularität .....	109
4.4.6.	Temperaturabhängigkeit der Trägheitsradien .....	110
4.5.	Ringförmige Makromoleküle .....	111
4.6.	Verzweigte Makromoleküle .....	112
4.6.1.	Einleitung .....	112
4.6.2.	Sternmoleküle .....	113
4.6.3.	Dendrimer-Moleküle .....	115
4.6.4.	Hypervverzweigte Moleküle .....	116
4.6.5.	Kamm-Moleküle .....	116
4.7.	Skalierung .....	118
4.7.1.	Einführung .....	118
4.7.2.	Fraktale .....	118
4.7.3.	Selbstähnlichkeit .....	120
4.8.	Atomistische und molekulare Modellierung .....	122
4.8.1.	Einführung .....	122
4.8.2.	Methoden .....	123
	Gruppeninkrement-Methoden .....	123
	Gittermethoden .....	123
	Gitterfreie Methoden .....	125
4.8.3.	Atomistische Kraftfelder .....	126
A-4.	Anhang .....	130
A-4.1.	Valenzwinkel-Kette mit freier Drehbarkeit .....	130
A-4.2.	Beziehung zwischen Fadenendenabstand und Trägheitsradius bei Phantom-Ketten .....	131
A-4.3.	Verteilung der Fadenendenabstände .....	133
	Historische Notizen .....	134
	Kraftfeld-Bibliographie .....	134

<b>5. Streumethoden</b>	138
5.1. Übersicht	138
5.2. Statische Lichtstreuung: Rayleigh-Bereich	139
5.2.1. Grundlagen	139
5.2.2. Copolymere	143
5.2.3. Konzentrationsabhängigkeit	144
5.2.4. Mischlöser	146
5.3. Statische Lichtstreuung: Debye-Bereich	149
5.3.1. Grundlagen	149
5.3.2. Streufunktion	150
5.3.3. Zimm-Diagramm	152
5.3.4. Einfluss der Teilchengestalt	153
Kugeln	153
Stäbchen	153
Statistische Knäuel	154
Wurmartige Ketten	156
Sternmoleküle	158
Kammoleküle	159
5.4. Röntgenkleinwinkelstreuung	160
5.4.1. Grundlagen	160
5.4.2. Streufunktionen	163
Knäuel	163
Verzweigte Polymere	165
5.5. Neutronenkleinwinkelstreuung	166
Historische Notizen	168

## Molekülverbände

<b>6. Ungeordnete kondensierte Systeme</b>	170
6.1. Amorphe Polymere	170
6.1.1. Struktur	170
6.1.2. Dichte	172
6.2. Polymerschmelzen	174
6.2.1. Mikrokonformationen	174
6.2.2. Makrokonformationen	175
6.3. Mässig konzentrierte Lösungen	176
6.3.1. Konzentrationsbereiche	176
6.3.2. Temperaturabhängigkeit der Knäueldimensionen	177
6.3.3. Verschlaufungen	179
6.3.4. Blobs	180
6.3.5. Trägheitsradien von Sternmolekülen	182
Historische Notizen	183
<b>7. Kristalline Zustände</b>	185
7.1. Kristallstrukturen	185

7.1.1.	Definitionen des Kristalls .....	185
7.1.2.	Gitterstrukturen .....	185
7.1.3.	Symmetrie-Eigenschaften .....	187
7.1.4.	Röntgenstrukturanalyse .....	189
7.1.5.	Gitterkonstanten .....	193
7.1.6.	Gitterstrukturen .....	195
7.1.7.	Polymorphie .....	197
7.1.8.	Isomorphie .....	198
7.1.9.	Einheitszellen .....	198
7.2.	Kristallitstrukturen .....	199
7.2.1.	Fransenmizellen .....	199
7.2.2.	Polymereinkristalle .....	200
7.3.	Kristallisation .....	206
7.3.1.	Keimbildung .....	207
	Homogene Keimbildung .....	207
	Heterogene Keimbildung .....	208
	Keimbildner .....	209
	Kristallisation aus Lösungen .....	209
	Kristallisation aus Schmelzen .....	211
7.3.2.	Kristallisationsgeschwindigkeit .....	212
7.4.	Überstrukturen .....	215
7.4.1.	Sphärolithe .....	216
7.4.2.	Andere Überstrukturen .....	217
7.4.3.	Einfluss der Kristallisationsbedingungen .....	218
7.5.	Kristallinität .....	221
7.5.1.	Ideale Kristalle .....	221
7.5.2.	Kristallisierbarkeit und Kristallinität .....	221
7.5.3.	Gitterdefekte .....	222
7.5.4.	Ein- und Zweiphasen-Modelle .....	223
7.5.5.	Röntgenographie .....	224
7.5.6.	Dichte-Messungen .....	225
7.5.7.	Kalorimetrie .....	226
7.5.8.	Infrarot-Spektroskopie .....	226
7.5.9.	Indirekte Methoden .....	227
7.6.	Orientierung .....	227
7.6.1.	Röntgen-Interferenzen .....	227
7.6.2.	Optische Doppelbrechung .....	228
7.6.3.	Schallfortpflanzung .....	229
7.6.4.	Infrarotdichroismus .....	230
7.6.5.	Polarisierte Fluoreszenz .....	231
	Historische Notizen .....	231
8.	Mesophasen .....	235
8.1.	Einführung .....	235
8.1.1.	Klassen von Mesophasen .....	235
8.1.2.	Andere Mesophasen .....	236

8.2.	Mesomorphe Zustände .....	237
8.2.1.	Mesogene .....	237
8.2.2.	Anordnung der Mesogene .....	239
8.3.	Lyotrope Flüssigkristalle .....	240
8.3.1.	Übersicht .....	240
8.3.2.	Phasentrennung .....	242
	Onsager-Theorie .....	243
	Flory-Theorie .....	243
8.3.3.	Chemische Potentiale .....	247
8.3.4.	Orientierung der Mesogene .....	250
8.3.5.	Amphotrope Flüssigkristalle .....	251
8.4.	Thermotrope Flüssigkristalle .....	252
8.4.1.	Strukturelle Voraussetzungen .....	253
8.4.2.	Strukturen in Mesophasen .....	254
8.4.3.	Eigenschaften von Mesophasen .....	255
8.5.	Blockpolymere .....	257
8.5.1.	Übersicht .....	257
8.5.2.	Thermotrope Domänen .....	257
8.5.3.	Lyotrope Strukturen .....	262
8.6.	Ionomere .....	264
	Historische Notizen .....	265
9.	Polymere in und an Grenzflächen .....	268
9.1.	Oberflächen von Polymeren .....	268
9.1.1.	Grundlagen .....	268
9.1.2.	Methoden .....	268
9.1.3.	Zusammensetzung .....	270
9.2.	Grenzflächenspannungen .....	271
9.2.1.	Grundlagen .....	271
9.2.2.	Messmethoden .....	271
9.2.3.	Zeiteffekte .....	273
9.2.4.	Oberflächenspannung von Polymerschmelzen .....	275
9.2.5.	Oberflächenspannung von Polymerlösungen .....	276
9.2.6.	Grenzflächenspannung zwischen zwei Flüssigkeiten .....	276
9.2.7.	Kritische Oberflächenspannung Festkörper-Flüssigkeit .....	277
9.3.	Spreitung von Polymeren auf Hypophasen .....	279
9.4.	Adsorption auf festen Oberflächen .....	281
9.4.1.	Grundlagen .....	281
9.4.2.	Methoden .....	282
9.4.3.	Zeitabhängigkeit .....	283
9.4.4.	Adsorptionsgleichgewichte .....	284
9.5.	Bürsten .....	285
9.5.1.	Abstoßungskräfte .....	286
9.5.2.	Blob-Theorie .....	286
9.5.3.	Rheologie .....	289
	Historische Notizen .....	290

## Lösungen

<b>10. Thermodynamik von Lösungen</b>	<b>292</b>
10.1. Phänomenologische Thermodynamik	292
10.1.1. Gestalt und Lösungseigenschaften	292
10.1.2. Thermodynamische Einteilung von Lösungen	293
10.1.3. Löslichkeitsparameter	295
Löslichkeitsparameter von Lösungsmitteln	296
Löslichkeitsparameter von Polymeren	296
Mischungsenthalpie	297
10.1.4. Molekulare Betrachtungen	299
Selbstassoziation von Lösungsmittelmolekülen	299
Solvatation	300
Vorzugssolvatation	300
10.1.5. Lösegeschwindigkeit	302
10.2. Statistische Thermodynamik	303
10.2.1. Einführung	303
10.2.2. Gittertheorie	304
Mischungsenthalpie	305
Wechselwirkungsparameter	305
Mischungsentropie	307
Gibbs-Mischungsenergie	308
Chemische Potentiale	309
Zusammenfassung	310
10.2.3. Phasentrennung	311
Lösungen amorpher Polymerer	311
Quasibinäre Systeme	312
Fäll- und Lösefraktionierung	313
Trübungstitration	315
Fällfraktionierung chemisch uneinheitlicher Polymerer	316
Polymerblends	316
Kritische Mischungstemperaturen	318
Kristalline Polymere	319
10.3. Osmotischer Druck	319
10.3.1. Grundlagen	321
10.3.2. Membranosmometrie	322
Semipermeable Membranen	322
Nichtsemipermeable Membranen	323
10.3.3. Ebullioskopie und Kryoskopie	324
10.3.4. Dampfdruckosmometrie	325
10.4. Virialkoeffizienten	326
10.4.1. Grundlagen	326
10.4.2. Gittertheorie	328
10.4.3. Einfluss des ausgeschlossenen Volumens	331
10.4.4. Einfluss der Molmasse	331
10.4.5. Einfluss der Temperatur	333



10.4.6.	Osmotischer Druck mässig konzentrierter Lösungen .....	334
10.5.	Assoziation und Selbstassoziation .....	336
10.5.1.	Grundlagen .....	336
10.5.2.	Offene Selbstassoziation .....	336
10.5.3.	Geschlossene Selbstassoziation .....	339
10.5.4.	Komplexierung kleiner Moleküle .....	343
10.5.5.	Polymer-Polymer-Komplexe .....	345
10.6.	Polyelektrolyte .....	348
10.6.1.	Struktur von Polyelektrolytlösungen .....	348
10.6.2.	Thermodynamische Aktivität .....	350
10.6.3.	Osmotischer Druck .....	351
10.6.4.	Gibbs-Mischungsenergie und Polyelektrolyt-Dimensionen ..	353
10.7.	Gele .....	354
10.7.1.	Übersicht .....	354
10.7.2.	Quellung chemisch vernetzter Gele .....	355
10.7.3.	Quellung elektrisch geladener, chemisch vernetzter Gele ...	357
10.7.4.	Physikalisch vernetzte Gele .....	358
<b>11.</b>	<b>Transport in Lösungen .....</b>	<b>363</b>
11.1.	Translationsdiffusion .....	363
11.1.1.	Einführung .....	363
11.1.2.	Messverfahren .....	365
	Klassisches Verfahren .....	365
	Dynamische Lichtstreuung .....	366
11.1.3.	Reibungskoeffizienten der Translation .....	368
	Kugeln .....	368
	Ellipsoide .....	368
	Stäbchen .....	369
	Knäuel .....	370
11.1.4.	Diffusionskoeffizienten .....	373
	Kugeln .....	373
	Stäbchen .....	375
	Knäuel .....	375
11.1.5.	Konzentrationsabhängigkeit .....	376
11.1.6.	Mässig konzentrierte Lösungen .....	377
11.1.7.	Strukturierter Fluss .....	379
11.2.	Rotationsdiffusion .....	380
11.2.1.	Einleitung .....	380
11.2.2.	Strömungsdoppelbrechung .....	380
11.2.3.	Reibungskoeffizienten der Rotation .....	382
	Kugeln und Ellipsoide .....	382
	Starre Stäbchen .....	382
11.3.	Sedimentation .....	383
11.3.1.	Grundlagen .....	383
11.3.2.	Sedimentationsgeschwindigkeit .....	384
11.3.3.	Konzentrationsabhängigkeit .....	386

11.3.4.	Molmassen .....	387
11.3.5.	Sedimentationsgleichgewicht .....	389
11.3.6.	Sedimentationsgleichgewicht im Dichtegradienten .....	390
11.4.	Kraftfeld-Flussfraktionierung .....	391
11.5.	Elektrophorese .....	392
<b>12.</b>	<b>Viskosität verdünnter Lösungen .....</b>	<b>395</b>
12.1.	Grundbegriffe .....	395
12.1.1.	Definitionen .....	395
12.1.2.	Experimentelle Methoden .....	396
12.2.	Konzentrationsabhängigkeit .....	399
12.2.1.	Nichtelektrolyte .....	399
12.2.2.	Polyelektrolyte .....	402
12.3.	Grenzviskositätszahlen .....	405
12.3.1.	Mittelwerte .....	405
12.3.2.	Hydrodynamische Volumina .....	407
12.3.3.	Kugeln .....	407
12.3.4.	Ellipsoide .....	408
12.3.5.	Stäbchen .....	410
12.3.6.	Ungestörte Knäuel .....	411
	$\alpha$ -Werte .....	412
	$K_v$ -Werte .....	413
	Hydrodynamische Radien .....	414
12.3.7.	Gestörte Knäuel .....	416
12.3.8.	Verzweigte Polymermoleküle .....	417
	Statistisch verzweigte Polymere .....	418
	Sternpolymere .....	420
	Hypervverzweigte Polymere .....	420
	Dendrimere .....	421
	Kammpolymere .....	422
12.3.9.	Scheibchen .....	423
12.3.10.	Polyelektrolyte .....	423
A 12.	Anhang: Flory-Konstanten .....	423
	Historische Notizen .....	424

## Schmelzen

<b>13.</b>	<b>Thermische Eigenschaften .....</b>	<b>426</b>
13.1.	Grundlagen .....	426
13.1.1.	Einführung .....	426
13.1.2.	Stoffzustände .....	427
13.1.3.	Ordnungen von Zustandsumwandlungen .....	427
13.1.4.	Methoden .....	430
13.2.	Molekülbewegungen .....	432
13.2.1.	Thermische Ausdehnung .....	432

13.2.2.	Wärmekapazität .....	433
13.2.3.	Wärmeleitfähigkeit .....	435
13.2.4.	Thermische Relaxationen .....	436
13.3.	Schmelzprozesse .....	438
13.3.1.	Grundlagen .....	438
13.3.2.	Einfluss der Morphologie .....	439
	Definition der Schmelztemperatur .....	439
	Einfluss der Aufheizgeschwindigkeit .....	440
	Einfluss der Kristallitgrösse .....	440
13.3.3.	Einfluss der Molmasse .....	442
13.3.4.	Einfluss der Konstitution .....	444
13.4.	Umwandlung von Flüssigkristallen .....	448
13.4.1.	Thermische Zustände .....	448
13.4.2.	Molmassenabhängigkeit .....	450
13.4.3.	Thermodynamische Grössen .....	450
13.5.	Glasübergänge .....	452
13.5.1.	Freies Volumen .....	453
13.5.2.	Molekulare Interpretationen .....	454
13.5.3.	Konstitutionseinflüsse .....	456
	Lineare Ketten .....	456
	Verzweigte Polymere .....	458
	Vernetzte Polymere .....	459
	Ionomere .....	460
13.5.4.	Weichmachung .....	461
	Äussere Weichmachung .....	461
	Innere Weichmachung .....	463
13.5.5.	Statische und dynamische Glastemperaturen .....	465
13.6.	Andere Umwandlungen und Relaxationen .....	467
14.	Transport in Polymeren .....	470
14.1.	Einleitung .....	470
14.2.	Transport in fluiden Polymerphasen .....	471
14.2.1.	Lösungsmittel in konzentrierten Polymerlösungen .....	471
14.2.2.	Polymere in Schmelzen .....	472
14.2.3.	Reptation von Polymerketten .....	474
14.2.4.	Polymerketten in Polymermatrizen .....	476
14.3.	Transport kleiner Moleküle durch Polymermatrizen .....	478
14.3.1.	Übersicht .....	478
14.3.2.	Permeationskoeffizienten .....	479
14.3.3.	Permeation von Gasen .....	481
14.3.4.	Permeation von Flüssigkeiten .....	483
14.4.	Transport von Polymeren durch Porenmembranen .....	484
14.4.1.	Porenmembranen .....	484
14.4.2.	Diffusion durch Poren .....	485
14.4.3.	Grössenausschlusschromatographie .....	487
	Historische Notizen .....	489

<b>15. Viskosität von Schmelzen</b>	491
15.1. Typen von Deformationen	491
15.2. Viskosimetrie	494
15.2.1. Typen von Viskositäten	494
15.2.2. Viskosimeter	495
15.3. Newton'sche Scherviskositäten	497
15.3.1. Lineare Polymere in Schmelzen	497
15.3.2. Rouse-Theorie	498
15.3.3. Korrekturen für das Rouse-Gebiet	499
15.3.4. Reptation	501
15.3.5. Nichtlineare Makromoleküle	502
15.4. Nicht-Newton'sche Scherviskositäten	504
15.4.1. Übersicht	504
15.4.2. Rheometrie	506
15.4.3. Schmelzeelastizität	508
15.5. Dehnviskositäten	509
15.5.1. Grundlagen	509
15.5.2. Schmelzen	510
15.5.3. Lösungen	512
Historische Notizen	514

## Festkörper

<b>16. Elastizität</b>	517
16.1. Einführung	517
16.2. Zugversuch	519
16.2.1. Grundbegriffe	519
Nominelle Zugwerte	519
Wahre Zugwerte	520
Spannungsweichmachung	521
16.2.2. Hooke'sches Gesetz	521
16.2.3. Poisson-Zahl	522
16.2.4. Prüfmethode	525
Zugmoduln	525
Biegemoduln	527
Moduln aus Schallgeschwindigkeiten	528
Gittermoduln	528
16.2.5. Einteilung von Polymeren	529
16.3. Energie-Elastizität	532
16.3.1. Generalisierte Hooke-Gleichung	533
16.3.2. Lineare Elastizitätstheorie	534
Spannungen	534
Verformungen	535
16.3.3. Steifheitskonstanten und Nachgiebigkeitskonstanten	538
Orthotrope Körper	537

Orientierte Körper .....	538
Isotrope Körper .....	540
16.3.4. Theoretische Moduln .....	541
16.3.5. Reale Elastizitätsmoduln .....	544
Mischungsregeln .....	545
Takayanagi-Modelle .....	546
Einfluss der Verarbeitung .....	547
16.4. Entropie-Elastizität .....	549
16.4.1. Phänomene .....	549
16.4.2. Entropie-Elastizität einzelner Moleküle .....	551
16.4.3. Chemische Thermodynamik .....	552
16.4.4. Statische Thermodynamik .....	555
16.4.5. Modelle .....	556
16.4.6. Uniaxiale Dehnung .....	559
16.4.7. Biaxiale Dehnung .....	561
16.4.8. Dehnung realer Netzwerke .....	561
16.4.9. Scheren von Netzwerken .....	563
Historische Notizen .....	565
<b>17. Viskoelastizität .....</b>	<b>568</b>
17.1. Einführung .....	568
17.1.1. Übersicht .....	568
17.1.2. Definitionen .....	568
17.2. Streckgrenze .....	571
17.2.1. Considère-Diagramm .....	571
17.2.2. Molekulare Ursachen für Fließgrenzen .....	572
17.2.3. Streckgrenze und Teleskopeffekt .....	575
17.2.4. Fließkriterien .....	576
17.3. Fließbereich .....	578
17.3.1. Crazes und Scherbänder .....	578
17.3.2. Einfluss der Verhakungsdichte .....	579
17.3.3. Anteile von Crazes und Scherbändern .....	580
17.3.4. Grosse Dehnungen .....	581
17.3.5. Nachgeben als Fließprozess .....	583
17.4. Kriechen und Relaxation .....	585
17.4.1. 2-Parameter-Modelle .....	585
17.4.2. Spannungsrelaxation .....	587
17.4.3. Kriechversuch .....	589
17.4.4. 3- und 4-Parameter-Modelle .....	590
17.4.5. Boltzmannsches Superpositionsprinzip .....	593
17.5. Dynamische Beanspruchungen .....	595
17.5.1. Erzwungene Schwingungen .....	595
17.5.2. Freie Schwingungen .....	597
17.5.3. Komplexe Moduln .....	598
17.5.4. Dynamische Moduln fester Polymerer .....	601
17.5.5. Scherspeichermoduln von Schmelzen .....	602

17.5.6. Scherspeichermodule von Lösungen .....	606
A-17. Anhang: Alternierende Deformationen .....	608
Historische Notizen .....	609
<b>18. Bruch von Polymeren .....</b>	<b>611</b>
18.1. Einleitung .....	611
18.1.1. Definitionen .....	611
18.1.2. Einfluss der Molmasse .....	612
18.2. Zugfestigkeit .....	614
18.2.1. Einführung .....	614
18.2.2. Bruch spröder Polymerer .....	615
18.2.3. Brucheinleitung .....	618
18.2.4. Bruchfortpflanzung .....	620
18.2.5. Theoretische Zugfestigkeiten .....	622
18.3. Reale Zugfestigkeiten .....	624
18.3.1. Einleitung .....	624
18.3.2. Kritische Spannungsintensitätsfaktoren .....	625
18.3.3. Bruchzähigkeit .....	627
18.3.4. Bruch duktiler Polymerer .....	628
18.3.5. Schlagzähigkeit .....	629
Historische Notizen .....	632
<b>19. Anhang .....</b>	<b>634</b>
19.1. SI-Einheiten und IUPAC-Symbole .....	634
Tab. 19-1 Physikalische Grundgrößen und SI-Einheiten .....	634
Tab. 19-2 Abgeleitete SI-Einheiten und IUPAC-Symbole .....	635
Tab. 19-3 Neben oder mit SI-Einheiten verwendete ältere Einheiten .....	636
Tab. 19-4 Vorsätze für SI-Einheiten im Dezimalsystem .....	637
Tab. 19-5 Vorsätze für binäre Systeme (Computerindustrie) .....	637
Tab. 19-6 Vorsatzzeichen in der U.S. Finanz- und Gaswirtschaft ....	638
Tab. 19-7 Römische Zahlzeichen .....	638
Tab. 19-8 Fundamentale Konstanten .....	638
Tab. 19-9 Umrechnungen von veralteten Einheiten .....	638
19.2. Verhältnisse physikalischer Größen .....	643
19.3. Konzentrationen .....	644
19.4. Abkürzungen für Kunststoffe, Fasern, Elastomere usw. ....	645
<b>Sachregister .....</b>	<b>646</b>
<b>Englische Fachausdrücke .....</b>	<b>668</b>