

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

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
----------------------------	----------

### Einzelne Makromoleküle

<b>2. Chemische Struktur</b> .....	<b>4</b>
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. 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( $\alpha$ -aminoäure)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. 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 (Behinderungsparameter) .....	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. Hyperverzweigte 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. Copolymer .....	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
Kammklebstoffe .....	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 Knäeldimensionen .....	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.	<b>Mesophasen .....</b>	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.	<b>Polymere in und an Grenzflächen</b> .....	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
10.2.3. Osmotischer Druck .....	319
10.3.1. Grundlagen .....	321
10.3.2. Membranosmometrie .....	322
Semipermeable Membranen .....	322
Nichtsemipermeable Membranen .....	323
10.3.3. Ebulioskopie 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. Polyeleklyte .....	348
10.6.1. Struktur von Polyeleklytlösungen .....	348
10.6.2. Thermodynamische Aktivität .....	350
10.6.3. Osmotischer Druck .....	351
10.6.4. Gibbs-Mischungsenergie und Polyeleklyt-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
 11. Transport in Lösungen .....	363
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
12. Viskosität verdünnter Lösungen .....	395
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
Hyperverzweigte 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

13. Thermische Eigenschaften .....	426
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>	<b>491</b>
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>	<b>517</b>
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. Prüfmethoden .....	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
17. Viskoelastizität .....	568
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. Scherspeichermodulen 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>