

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Autorenverzeichnis</b> . . . . .	<b>XV</b>
<b>1 Einführung</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 Struktur der Makromoleküle</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 Grundbegriffe . . . . .	3
2.1.1 Klassifizierung der Makromoleküle . . . . .	4
2.1.2 Nomenklatur . . . . .	5
2.1.3 Polymerisationsgrad und Molmasse . . . . .	15
2.1.4 Differentielle und integrale Verteilungen . . . . .	20
2.2 Konstitution . . . . .	23
2.2.1 Konstitutionsisomerie . . . . .	24
2.2.2 Copolymere . . . . .	25
2.2.3 Molekularstruktur . . . . .	28
2.3 Konfiguration . . . . .	34
2.3.1 Definition . . . . .	34
2.3.2 Monotaktische Polymere . . . . .	35
2.3.3 Ditaktische Polymere . . . . .	37
2.3.4 Ataktische Polymere . . . . .	38
2.3.5 <i>Cis-trans</i> -Isomerie . . . . .	38
2.4 Konformation . . . . .	39
2.4.1 Einleitung . . . . .	39
2.4.2 Mikrokonformationen . . . . .	40
2.4.3 Makrokonformationen . . . . .	43
2.4.4 Konformationsstatistik . . . . .	44
<b>3 Synthese von Makromolekülen, Polyreaktionen</b> . . . . .	<b>61</b>
3.1 Kettenwachstumsreaktionen . . . . .	63
3.1.1 Radikalische Polymerisation . . . . .	67
3.1.2 Ionische Polymerisation . . . . .	92
3.1.3 Koordinative Polymerisation . . . . .	115

---

3.1.4	Gruppentransferpolymerisation	130
3.1.5	Copolymerisation	131
3.2	Stufenwachstumsreaktionen	150
3.2.1	Polykondensation	154
3.2.2	Polyaddition	175
3.2.3	Dendrimere	180
3.2.4	<i>In vitro</i> -Synthese von Biopolymeren	182
3.3	Organische Polymere mit anorganischen Gruppen	190
3.3.1	Polyorganosiloxane (Silikone)	192
3.3.2	Polysilane	194
3.3.3	Polycarbosilane und Polycarbosiloxane	195
3.3.4	Polygermane	195
3.3.5	Polymere abgeleitet von Zinn, Blei und weiteren Elementen der 4. Gruppen	196
3.3.6	Bor enthaltende Polymere	197
3.3.7	Aluminium enthaltende Polymere	197
3.3.8	Stickstoff enthaltende ungewöhnliche Polymere	198
3.3.9	Phosphor enthaltende Polymere	198
3.3.10	Arsen, Antimon und Wismut enthaltende Polymere	200
3.3.11	Selen und Tellur enthaltende Polymere	200
3.3.12	Polymere mit Übergangsmetallen in der Kette und Koordinationspolymere	201
3.4	Polyreaktionstechnik	204
3.4.1	Lösungspolymerisation	206
3.4.2	Fällungspolymerisation	207
3.4.3	Substanzpolymerisation	208
3.4.4	Gasphasenpolymerisation	211
3.4.5	Polymerisation in fester Phase	212
3.4.6	Polymerisation in Einschlussverbindungen	212
3.4.7	Suspensionspolymerisation	213
3.4.8	Emulsionspolymerisation	215
3.4.9	Polymerisation monomolekularer Schichten nach Langmuir-Blodgett	218
3.4.10	Interphasenpolykondensation (Grenzflächenpolykondensation)	219
4	Das Makromolekül in Lösung	221
4.1	Verteilungsfunktionen	221
4.1.1	Die Kettenendenabstandsverteilung	221
4.1.2	Verallgemeinerung auf drei Dimensionen	224
4.1.3	Segmentdichteverteilung	228
4.2	Thermodynamik von Polymerlösungen	233
4.2.1	Ideale und reale Lösungen	233

4.2.2	Das Gittermodell und die <i>Flory-Huggins</i> Theorie . . . . .	238
4.2.3	Die Löslichkeitstheorie . . . . .	249
4.2.4	Phasengleichgewichte . . . . .	254
4.2.5	Theorie des ausgeschlossenen Volumens . . . . .	263
4.2.6	Scaling-Theorie . . . . .	280
4.2.7	Vernetzte Makromoleküle und Kautschuk-Elastizität . . . . .	284
4.2.8	Zustandsgleichungen . . . . .	298
4.3	Charakterisierung von Makromolekülen . . . . .	302
4.3.1	Kolligative Eigenschaften . . . . .	303
4.3.2	Ultrazentrifugation . . . . .	308
4.3.3	Klassische Streumethoden . . . . .	321
4.3.4	Dynamische Lichtstreuung . . . . .	353
4.3.5	Transportprozesse . . . . .	359
4.3.6	Chromatographische Verfahren . . . . .	389
4.3.7	Endgruppenanalyse . . . . .	400
4.3.8	Spektroskopische Methoden . . . . .	401
4.3.9	Kernresonanz-Spektroskopie (NMR) . . . . .	409
4.3.10	Elektrische Doppelbrechung und der Rotations-Diffusionskoeffizient . . . . .	419
4.3.11	Feldfluss-Fraktionierung (FFF) . . . . .	421
4.3.12	Bestimmung der Kettenverzweigung von Polymeren . . . . .	425
5	<b>Das Makromolekül als Festkörper und als Schmelze . . . . .</b>	429
5.1	Strukturen . . . . .	429
5.1.1	Klassifizierung . . . . .	429
5.1.2	Kristalline Polymere . . . . .	430
5.1.3	Amorphe Polymere . . . . .	452
5.2	Thermische Eigenschaften und thermische Umwandlungen . . . . .	454
5.2.1	Phasenübergänge erster und zweiter Art . . . . .	454
5.2.2	Messmethoden zur Ermittlung thermischer Umwandlungen . . . . .	455
5.2.3	Thermische Größen . . . . .	458
5.2.4	Glasübergänge . . . . .	463
5.2.5	Schmelzen . . . . .	470
5.2.6	Andere Umwandlungstemperaturen . . . . .	477
5.3	Mechanische Eigenschaften, Rheologie . . . . .	478
5.3.1	Dehnung und Dehnungsmodul . . . . .	479
5.3.2	<i>Poissonsche</i> Zahl . . . . .	479
5.3.3	Kompression und Kompressionsmodul . . . . .	481
5.3.4	Scherung und Schubmodul . . . . .	481
5.3.5	Die Konstanten $E$ , $G$ , $K$ und die Schallgeschwindigkeit . . . . .	482
5.3.6	Viskoelastizität und Zeitabhängigkeit . . . . .	485
5.3.7	Das <i>Boltzmannsche</i> Superpositionsprinzip . . . . .	490

---

5.3.8	Mechanisch dynamische Prozesse . . . . .	492
5.3.9	Das Torsionspendel . . . . .	493
5.3.10	Die Frequenzabhängigkeit der Elastizitätskonstanten $E_R$ , $E_I$ und $\tan \delta$ . . . . .	497
5.3.11	Die Temperaturabhängigkeit von $E$ für $\omega = 0$ . . . . .	499
5.3.12	Das Zeit-Temperatur Superpositionsprinzip . . . . .	501
5.3.13	Molekulare Interpretation des Elastizitätsmoduls . . . . .	504
5.3.14	Anelastisches Verhalten . . . . .	508
5.3.15	Der Teleskop-Effekt . . . . .	510
5.3.16	Die nominelle Spannung . . . . .	512
5.3.17	Bruchvorgänge . . . . .	513
5.3.18	Schlag- und Kerbschlagzähigkeit . . . . .	516
5.3.19	Spannungskorrosion . . . . .	519
5.3.20	Zeitstandzugfestigkeiten und Ermüdungsbrüche . . . . .	519
5.3.21	Härte . . . . .	521
5.3.22	Reibung . . . . .	524
5.3.23	Abrieb . . . . .	525
5.4	Optische und elektrische Eigenschaften . . . . .	526
5.4.1	Optische Eigenschaften . . . . .	526
5.4.2	Elektrische Eigenschaften . . . . .	530
5.5	Makromolekulare Struktur und makroskopische Eigenschaften . . . . .	543
5.5.1	Mechanische und optische Eigenschaften . . . . .	543
5.5.2	Polymere als organische Halbleiter . . . . .	582
5.6	Verarbeitung von Makromolekülen . . . . .	591
5.6.1	Allgemeine Aspekte . . . . .	591
5.6.2	Modifizierung des Rohpolymers . . . . .	594
5.6.3	Verarbeitung der Thermoplaste und Duroplaste . . . . .	597
5.6.4	Verarbeitung der Elastomere . . . . .	623
5.6.5	Verarbeitung zu polymeren Verbundstoffen . . . . .	628
5.6.6	Oberflächenveredlung . . . . .	633
5.6.7	Verarbeitung zu Synthesefasern . . . . .	635
6	Qualitative Analyse von Makromolekülen . . . . .	643
6.1	Äußere Merkmale . . . . .	644
6.1.1	Aussehen, Farbe, Transparenz, Oberfläche . . . . .	644
6.1.2	Spannungs-Dehnungsverhalten . . . . .	644

---

6.2	Abtrennung von Hilfsstoffen . . . . .	645
6.3	Qualitative Analysen . . . . .	645
6.3.1	Beilsteinprobe auf Halogene . . . . .	645
6.3.2	Brennprobe . . . . .	645
6.3.3	Trockenes Erhitzen im Glührohr . . . . .	646
6.3.4	Schmelzbereich . . . . .	647
6.3.5	Nachweis von Heteroelementen . . . . .	647
6.4	Löslichkeit von Polymeren . . . . .	649
6.4.1	Homopolymere . . . . .	649
6.4.2	Copolymere, Polymerblends . . . . .	649
7	<b>Reaktionen an Makromolekülen . . . . .</b>	651
7.1	Besonderheiten der Reaktionen an Makromolekülen . . . . .	652
7.2	Polymeranaloge Reaktionen . . . . .	654
7.3	Polysaccharidchemie . . . . .	658
7.3.1	Cellulosechemie . . . . .	658
7.3.2	Stärkechemie . . . . .	659
7.4	Vernetzungen . . . . .	660
7.5	Alterung und Alterungsschutz von Polymeren . . . . .	664
7.5.1	Alterung von Polymeren . . . . .	664
7.5.2	Alterungsschutz von Polymeren . . . . .	680
8	<b>Verwertung von Kunststoffen . . . . .</b>	685
8.1	Kunststoffe und Umwelt – der Lebensweg zählt . . . . .	685
8.2	Abfallmanagement: Ziele & Rahmen – Strategien & Konzepte . . . . .	688
8.2.1	Rechtlicher Rahmen . . . . .	689
8.2.2	Strategien & Konzepte . . . . .	690
8.3	Kunststoffabfälle sind Rohstoffe . . . . .	691
8.3.1	Kunststoffe in Abfallströmen . . . . .	691
8.3.2	Verwertung statt Deponierung . . . . .	692
8.3.3	Littering . . . . .	696
8.4	Abfallmanagement . . . . .	697
8.4.1	Abfallerfassung . . . . .	697
8.4.2	Abfallvorbehandlung . . . . .	700
8.5	Kunststoffabfälle und Sekundärressourcen . . . . .	703

<b>Abkürzungen von Polymeren</b> . . . . .	705
<b>Physikalische Größen</b> . . . . .	709
<b>Literatur</b> . . . . .	713
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	719