



Hans-Georg Elias

# Makromoleküle

**Band 3**

**Industrielle Polymere  
und Synthesen**

6., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage

 **WILEY-VCH**

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

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

Hans-Georg Elias

# **Makromoleküle**

**Band 3**

**Industrielle Polymere und  
Synthesen**

 **WILEY-VCH**

Hans-Georg Elias

# **Makromoleküle**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

Band 1: Chemische Struktur und Synthesen

Band 2: Physikalische Strukturen und Eigenschaften

Band 3: Industrielle Polymere und Synthesen

Band 4: Anwendungen

Hans-Georg Elias

# Makromoleküle

**Band 3**

**Industrielle Polymere  
und Synthesen**

6., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage

 **WILEY-VCH**

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

Prof. Dr. Hans-Georg Elias  
Michigan Molecular Institute  
1920 West St. Andrews Road  
Midland, Michigan 48640  
USA

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

1. Auflage 1971
- 2., überarbeitete Auflage 1972
- 3., überarbeitete und erweiterte Auflage 1975
- 4., überarbeitete und erweiterte Auflage 1981
- 5., überarbeitete und erweiterte Auflage: Band 1: 1990  
Band 2: 1992
- 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage: Band 1: 1999  
Band 2: 2001  
Band 3: 2001  
Band 4: in Vorbereitung

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

ISBN 3-527-29961-0

© Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungs-maschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation in other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Druck: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach  
Bindung: J. Schäffer GmbH & Co. KG, Grünstadt

Printed in the Federal Republic of Germany.

The polymers, those giant molecules,  
like starch and polyoxymethylene,  
flesh out, as protein serfs and plastic fools,  
the Kingdom with life's stuff.

John Updike,  
The Dance of the Solids  
("Midpoint and Other Poems")  
A.Knopf, New York 1968

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer



## Vorwort zu Band III der sechsten Auflage

Im ersten Band des vierbändigen Werkes "Makromoleküle" wurden die chemischen Strukturen und Synthesen von natürlichen und synthetischen Makromolekülen besprochen, im zweiten Band die physikalischen Strukturen und Eigenschaften solcher Makromoleküle, sowie diejenigen der aus ihnen aufgebauten makromolekularen Substanzen. Beide Bände behandelten im Wesentlichen die Grundlagen, was notwendigerweise ideale und idealisierte Strukturen, Prozesse und Eigenschaften beinhaltet.

In Natur und Technik findet man jedoch selten ideale Prozesse. Die Gründe dafür sind vielfältig. Anwesende Nebenreaktionen, unterschiedliche Reinheit der Rohmaterialien, angestrebte Wirtschaftlichkeit der Verfahren, Variationen der Verfahrensführung usw. sorgen dafür, das aus dem gleichen Monomeren viele verschiedene Typen von Polymeren entstehen. Reale Poly(ethylen)e sind z.B. nicht nur aus dem idealen Grundbaustein  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  aufgebaut.

Während grosstechnische Polymere aus wirtschaftlichen Gründen meist aus relativ wenigen Monomertypen aufgebaut sind, liegen den Spezialpolymeren in der Regel eine Vielzahl sehr verschiedener Monomere zu Grunde. Informationen über solche Polymeren sind in den Standardlehrbüchern nur selten zu finden. Monographien über einzelne Polymere sind andererseits meist anwendungstechnisch orientiert. Der vorliegende Band III gibt daher in den Kap. 5-11 eine Übersicht über die Synthese und grundlegenden Eigenschaften und Anwendungen der technisch und wissenschaftlich wichtigsten Polymeren, geordnet nach ihren Kettenstrukturen, was meist auch einer Ordnung nach Rohstoffen und/oder Syntheseverfahren entspricht.

Da in diesem Band III die technischen Synthesen im Vordergrund stehen und die Verarbeitung, Ausrüstung und Anwendung wichtiger Polymerer als Kunststoffe, Fasern, Elastomere, Verdicker usw. zudem im Band IV zusammenfassend besprochen werden, geht der vorliegende Band III nur kurz auf die Anwendungen und Eigenschaften der beschriebenen Polymeren ein. Für jedes Polymer wurden aber, falls zugänglich oder zweckmässig, die mittleren Eigenschaften für nicht verarbeitete, nicht modifizierte Typen tabelliert, wobei die Daten sowohl aus Handbüchern als auch aus Firmendaten entnommen und, falls notwendig, gewichtet wurden. Die entsprechenden Daten für verarbeitete Polymere (z.B. Fasern und Elastomere), spezielle ausgerüstete Qualitäten (z.B. glasfaserverstärkte Sorten) usw. finden sich in Band IV. Eine Ausnahme sind jedoch die mehr exotischen Polymeren, deren Eigenschaften und Anwendungen sich nicht so leicht generalisieren lassen. Auf sie wurde relativ zu den Standardpolymeren etwas ausführlicher eingegangen.

Der gewünschte Überblick würde jedoch nicht erzielt, wenn nicht auch die Rohstoffe für Polymere und der zur Synthese und Verarbeitung erforderliche Energiebedarf zumindest gestreift würden (Kap. 3). Polymere stehen schliesslich in Konkurrenz zu anderen Materialien und der wirtschaftliche Erfolg ist die Triebfeder des industriellen Tuns. Die Änderung der Produktion bzw. des Verbrauchs von Polymeren ist *ein* Massstab für die wirtschaftliche Entwicklung, speziell bei dem zu beobachtenden Übergang von staatlichen Ökonomien zu regionalen Blöcken und von dort zur Weltwirtschaft.

Leider sind jedoch die diesbezüglichen Statistiken unvollständig, nicht vergleichbar, veraltet oder mir nicht immer zugänglich. Zur Illustration wurden daher sowohl Wirtschaftsdaten der Welt als auch solche der drei grossen Wirtschaftsmächte USA, Deutsch-

land und Japan herangezogen; ein Bezug auf nur einen Staat (z.B. Deutschland) oder nur eine Region (z.B. Europäische Gemeinschaft) ist wegen des Weltwirtschaftsverbundes wenig sinnvoll.

Zum Verständnis der Ausführungen in den Kap. 5-11 und speziell der *termini technici* wurden in Kap. 4 kurz die Grundlagen der chemischen Verfahrenstechnik der Polymeren skizziert. Aus Platzgründen konnte dabei nicht auf Details eingegangen werden (Reaktoren, Trockner, Pumpen usw.). Für eine vertiefte Behandlung der Chemie der Synthesen ist der Band I heranzuziehen.

Damit das Buch allein lesbar ist, wurde ausserdem den Kap. 3-11 mit Kap. 2 eine Übersicht über chemische und physikalische Strukturen von Polymeren sowie deren industriell relevante Eigenschaften und deren Prüfverfahren vorgeschaltet. Detailliertere Behandlungen der chemischen Struktur sind in Band I, der physikalischen Strukturen und Eigenschaften in Band II, und der Prüfverfahren in Band IV zu finden. Der Band IV geht auch auf Additive (Füllstoffe, Weichmacher, Farbstoffe usw.) ein.

Der Band III ist jedoch keine Enzyklopädie. Aus Platzgründen und selbstverständlich auch wegen der Unmöglichkeit, alle verfügbaren Informationen zu erfassen, können nur wesentliche Gesichtspunkte exemplarisch behandelt werden. Eine vollständige Aufzählung aller Stoffeigenschaften, Verfahrensvarianten, Eigenschaftsdaten und Anwendungsbereiche ist weder möglich noch angestrebt. Andererseits soll ein solches Buch die Fülle der Möglichkeiten vor Augen führen. Es kann sich nicht wie die Bände I und II auf die Grundlagen beschränken und muss auf die Komplexität der Zusammenhänge zumindest hinweisen. Der Band III ist daher wesentlich qualitativ beschreibender als die Bände I und II, welche die Dinge mehr quantitativ behandeln.

Ein Lehrbuch ist auch kein Referenzbuch; zur Vertiefung wird daher auf Übersichtsarbeiten und Bücher verwiesen. Originalarbeiten wurden nur in wenigen Fällen angeführt, da sie meist zu speziell sind. Aus diesem Grunde wurde auch (mit wenigen Ausnahmen) auf die Zitierung von in Buchform vorliegenden Tagungsberichten verzichtet, da diese Bücher in der Regel Originalarbeiten (oft als zweiten Aufguss) oder Übersichten enthalten, die sich leider nur zu oft lediglich auf die Arbeiten bzw. Interessen des jeweiligen Vortragenden konzentrieren. Chemische Verbindungen werden mit den technisch verwendeten Namen bezeichnet; wissenschaftliche Namen sind zwar archivarisch wichtig, aber im täglichen Gebrauch viel zu umständlich.

Mein Dank gilt Herrn Jens Stettner, Fachhochschule Osnabrück, der bei seinem Forschungsaufenthalt am Michigan Molecular Institute freundlicherweise die Kap. 3 und 5 bis 11 durchsah.

## Aus dem Vorwort zur 1.-5.Auflage

Dieses Lehrbuch ist – wie so viele seiner Art – aus den Bedürfnissen des Unterrichts entstanden. Im obligatorischen Unterricht in den makromolekularen Wissenschaften für die Chemiker und Werkstoffkundler des 3.-7.Semesters (ETH Zürich) hatte ich seit vielen Jahren ein Lehrbuch vermisst, das von den Grundlagen der Chemie und Physik makromolekularer Substanzen bis zu den Anwendungen der Makromoleküle in der Technik führte. Dieses Lehrbuch sollte die Lücke zwischen den kurzen und daher oft zu sehr simplifizierenden Einführungen und den hochspezialisierten Lehrbüchern und Monographien über Teilgebiete der makromolekularen Wissenschaften schliessen und einen Überblick über das Gesamtgebiet vermitteln ...

Bei den einzelnen Kapiteln wird eine angemessene Kenntnis der anorganischen, organischen und physikalischen Chemie einschliesslich der dort verwendeten Methoden vorausgesetzt. Alle für die Wissenschaft der Makromoleküle wichtigen Überlegungen und Ableitungen wurden jedoch – wenn immer möglich – von den Grundphänomenen und -überlegungen aus Schritt für Schritt vorgenommen. Ich hoffe daher, dass sich dieses Buch zum Selbststudium eignet. In einigen Fällen war ich gezwungen, strengere Ableitungen mit ihrem zwangsläufig grösseren mathematischen Aufwand zugunsten halbquantitativer, aber durchsichtigerer Ansätze zu vernachlässigen ...

Ich habe also ähnlich wie Dr. Andreas Libavius den Lehrstoff in

"mühevoller Arbeit, hauptsächlich aus den allerorten verstreuten Einzelangaben der besten alten und neueren Autoren, ferner auch aus etlichen allgemeinen Lehrvorschriften zusammengetragen und anhand theoretischer Überlegung und grösstmöglicher praktischer Erfahrung nach sorgfältiger Methode dargelegt und zu einem einheitlichen Gesamtwerk verarbeitet." \*)

\*) *Operâ e dispersis passi optimorum autorum, verterum recentium exemplis potissimum, tum etiam praeceptis quibusdam operosè collecta, adhibitis; ratione experientia, quanta potuit esse, methodo accuratâ explicata & in integrum corpus redacta.*

Die Alchemie des Andreas Libavius (Ein Lehrbuch der Chemie aus dem Jahre 1597)  
Gmelin Institut für anorganische Chemie, Hrsg., VCH, Weinheim, 2.Nachdruck der 1.Auflage 1964.

Der Leser möge beurteilen, inwieweit dies für das vorliegende Lehrbuch gelungen ist.

## Verzeichnis der Abkürzungen

IUPAC, Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, Blackwell Scientific Publ., Oxford 1988 (Green Book)

IUPAC, Grössen, Einheiten und Symbole in der Physikalischen Chemie, VCH, Weinheim 1996

Abkürzungen für *Sprachhinweise*:

D: Deutsch	E: Englisch (in amerikanischer Schreibweise)
F: Französisch	G: Griechisch
L: Lateinisch	

Bei *chemischen Formeln* wurden folgende Konventionen getroffen:

R: Symbol für einen monovalenten Liganden, z.B.  $\text{CH}_3^-$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5^-$  (IUPAC)

Z: Symbol für einen divalenten Rest, z.B.  $-\text{CH}_2-$ ,  $-p\text{-C}_6\text{H}_4-$

Y: Symbol für einen trivalenten Rest

X: Symbol für einen tetravalenten Rest

Weitere Konventionen in diesem Buch:

A, B: entweder Monomere, die zu Grundbausteinen -a- bzw. -b- führen, oder abspaltbare Reste funktioneller Gruppen (z.B.  $-\text{OH}$  von  $-\text{COOH}$ )

L = AB: Symbol für ein Abgangsmolekül, z.B.  $\text{H}_2\text{O}$  aus  $-\text{OH} + \text{HOOC}-$

$p\text{-C}_6\text{H}_4$ : in para-Stellung (1,4-) substituierter Benzolrest (*para*-Phenylen) (Formeln)

$p\text{Ph}$ : in para-Stellung (1,4-) substituierter Benzolrest (*para*-Phenylen) (Text)

MATHEMATISCHE SYMBOLE (entsprechend den IUPAC-Empfehlungen)

=	gleich	>	grösser als
≠	ungleich	≥	gleich oder grösser als
≡	identisch gleich	>>	sehr viel grösser als
≈	ungefähr gleich	<	kleiner als
~	proportional (IUPAC: ~ oder ∞)	≤	gleich oder kleiner als
→	nähert sich an	<<	sehr viel kleiner als
∞	unendlich	±	plus oder minus
Δ	Differenz	sin	Sinus
δ	Differenzial	cos	Cosinus
∂	partiell Differential	tan	Tangens
Σ	Summe	cot	Cotangens
∫	Integral	sinh	Sinus hyperbolicus
Π	Produkt	grad	Gradient (identisch mit dem Nablaoperator ∇)

lg dekadischer Logarithmus (Basis 10); IUPAC: lg oder  $\log_{10}$

ln natürlicher Logarithmus (Basis e); IUPAC: ln oder  $\log_e$

## SYMBOLE UM BUCHSTABEN

- ( ) Mittelwert bei räumlichen Grössen (IUPAC), z.B.  $\langle r^2 \rangle$  = Mittel über die Quadrate der Fadenendenabstände  $r$
- [ ] Stoffmengenkonzentration ("Molkonzentration")

## HOCHGESTELLTE SYMBOLE ÜBER EINEM BUCHSTABEN

- ~ Partielle Grösse, z.B.  $\tilde{v}_A$  = partielles spezifisches Volumen der Komponenten A
- Mittelwertsstrich, z.B.  $\bar{M}_n$  = Zahlenmittel der Molmasse  $M$

## HOCHGESTELLTE SYMBOLE HINTER EINEM BUCHSTABEN

- ° Winkelgrad
- ' Winkelminute
- " Winkelsekunde
- o reine Substanz oder Standardzustand
- ∞ unendlich (z.B. Verdünnung oder Molmasse)
- m auf die Stoffmenge (in mol usw.) bezogene Grösse, wenn ein tiefgestelltes m unzweckmässig wäre. Beide Schreibweisen sind nach IUPAC zulässig.
- (q) q-te Ordnung eines Momentes (immer in Klammern, da niemals zur q-ten Potenz).
- ‡ aktivierte Grösse, z.B.  $E^\ddagger$  = Aktivierungsenergie
- a allgemeiner Exponent in  $P = K_P M^a$  ( $P$  = Eigenschaft)
- q allgemeiner Exponent mit wechselnder Bedeutung
- $\alpha$  Exponent in der Grenzviskositätszahl/Molmasse-Beziehung  $[\eta] = K_v M^\alpha$
- $\nu$  Exponent in der Beziehung  $\langle s^2 \rangle^{1/2} = K_s M^\nu$
- $\delta$  Exponent in der Beziehung  $D = K_D M^\delta$
- $\varsigma$  Exponent in der Beziehung  $S = K_S M^\varsigma$

## TIEFGESTELLTE SYMBOLE HINTER EINEM BUCHSTABEN

- o Grund- oder Standardzustand (z.B. bei ungestörten Dimensionen)
- 0 Anfangsbedingung (z.B. zur Zeit Null); nicht Standardzustand
- 1 Lösungsmittel (jedoch S, falls in Solvathülle)
- 2 Gelöstes, meist Polymeres (in Ausnahmefällen als P)
- 3 zusätzliche Komponente, z.B. Salz, Fällungsmittel, usw.
- ∞ Endzustand
- A Substanz A, z.B.  $M_A$  = Molmasse der Substanz A
- a Gruppe, Grundbaustein oder Kettenglied, z.B. als Masse  $m_a$  von a
- am amorph
- B Substanz B
- B Bruch
- b Gruppe, Grundbaustein oder Kettenglied b in einem Makromolekül
- b Bindung (speziell Kettenbindung)
- bd Bindung (wenn Verwechslungsgefahr mit b für Gruppe, usw.)
- be effektive Bindungslänge (= auf die Kettenrichtung projizierte Länge z.B. der Monomereinheit)
- bp Siedeprozess (E: boiling point)
- br Verzweigung oder verzweigt (E: branch(ed))

c	Kette (L: <i>catena</i> ), z.B. Netzwerkkette
c	kritisch (nur bei thermodynamischen Grenztemperaturen, weil dort international gebräuchlich, sonst "crit").
cl	Korrelation ( $L_{cl}$ = Korrelationslänge)
comb	Kombination
cr	kristallin
crit	kritisch
cryst	Kristallisation
cycl	ringförmig (cyclisch)
D	bezogen auf Diffusion
e	Verhakung, Verschlaufung (E: entanglement)
el	elastisch
eff	effektiv
end	Endgruppe
eq	Gleichgewicht (L: <i>aequilibrium</i> )
exc	Exzess (Überschuss)
F	Füllstoff
f	biegsam (E: flexural)
G	Glaszustand
g	beliebige statistische Wichtung, z. B. n, m, z oder x, w, Z
H	hydrodynamisch effektive Grösse oder Hydratation
h	hydrodynamisch (z.B. hD bei der Diffusion, hv bei der Viskosität)
I	Initiator
i	Laufzahl, z.B. <i>i-ten</i> Komponente
i	isotaktische Diade (IUPAC schlägt das Symbol m = meso vor; vgl. Band I)
ii	isotaktische Triade (IUPAC: mm)
is	heterotaktische Triade (IUPAC: mr)
isl	Summe der heterotaktischen Triaden is + si
j	Laufzahl
k	Laufzahl
kn	Knäuel
L	Flüssigkeit, Schmelze (L: <i>liquidus</i> )
l	flüssig
M	Schmelzprozess
M	Monomermolekül
M	Matrix (bei Blends, verstärkten Polymeren, usw.)
Mt	Metall
m	Monomereinheit in Makromolekülen
m	molar (evtl. auch als Hochzahl m)

md	Median
mol	Molekül
mon	Monomeres (falls M missverständlich ist)
n	Zahlenmittel
P	Polymer
p	Polymerisation, insbesondere Wachstum (E: propagation)
pol	Polymer (falls P missverständlich ist)
ps	Persistenz
q	variable Hilfsgrösse, für jedes Unterkapitel verschieden definiert
q	elektrische Ladung
R	Reaktant
R	Verhaltung (E: retention)
r	auf den Fadenendenabstand bezogen, z.B. $\alpha_r$ = auf den Fadenendenabstand bezogener Ausdehnungskoeffizient eines Knäuels
rel	relativ
red	reduziert
rep	Repetiereinheit
rlx	Relaxation
S	solvatisierendes Lösungsmittel
S	bezogen auf die Sedimentation
s	syndiotaktische Diade (IUPAC schlägt das Symbol r = <i>racemo</i> vor)
s	bezogen auf den Trägheitsradius
seg	Segment beliebiger Länge
si	heterotaktische Triade (IUPAC: rm)
sph	Kugel (G: <i>sphaira</i> )
ss	syndiotaktische Triade (IUPAC: rr)
st	Startreaktion
t	Abbruchreaktion ("Terminierung")
tr	Übertragungsreaktion ("Transfer")
u	Grundbaustein, Monomereinheit im Polymeren
u	Umsatz
v	Viskosität
w	Massenmittel ("Gewichtsmittel")
x	Vernetzung
y	Streckgrenze (E: yield)
z	z-Mittel

PRÄFIXES VON WORTEN (in systematischen Namen *kursiv* geschrieben)

alt	alternierend
at	ataktisch
b	block (IUPAC empfiehlt block)
blend	Polymerblend (Polymermischung)
br	verzweigt (nicht spezifiziert; E: branched). IUPAC empfiehlt sh-branch = kurzkettenverzweigt (E: short), l-branch = langkettenverzweigt; f-branch = verzweigt mit einem Verzweigungspunkt der Funktionalität <i>f</i>
c	ringförmig ("cyclisch"); IUPAC empfiehlt cyclo
cb	kammartig (IUPAC empfiehlt comb)
co	gemeinsam (unspezifiziert)
compl	Polymer-Polymer-Komplex
ct	cis-taktisch
eit	erythrodiisotaktisch
g	Graft- (Pfropf-)
ht	heterotaktisch
ipn	interpenetrierendes Netzwerk
it	isotaktisch
net	Netzwerk (IUPAC); $\mu$ -net = Mikronetzwerk
per	periodisch
r	statistisch im Sinne einer Bernoulli-Verteilung (E: random)
sign	semi-interpenetrierendes Netzwerk
stat	statistisch (mit unspezifizierter Verteilung)
sr	sternförmig (IUPAC empfiehlt star sowie f-star, wenn die Funktionalität des Kerns bekannt ist; <i>f</i> ist dann eine Zahl).
st	syndiotaktisch
tit	threodiisotaktisch
tt	trans-taktisch

## ANDERE ABKÜRZUNGEN

AIBN	<i>N,N'</i> -Azobisisobutyronitril
BPO	Dibenzoylperoxid
Bu	Butylgruppe ( <i>i</i> Bu = Isobutyl, <i>s</i> Bu = sekundäre Butylgruppe, <i>t</i> Bu = tertiäre Butylgruppe; die normale Butylgruppe wird nach IUPAC unlogischerweise <i>nicht</i> durch <i>n</i> gekennzeichnet!).
C	Katalysator (C* = aktiver Katalysator oder aktives Katalysatorzentrum)
cell	Celluloserest
Cp	Cyclopentadienyl(gruppe)
DMF	<i>N,N</i> -Dimethylformamid
DMSO	Dimethylsulfoxid
Et	Ethyl(gruppe)
G	gauche
GPC	Gelpermeationschromatographie
I	Initiator
IR	Infrarot



L	Lösungsmittel
LC	flüssig-kristallin (E: liquid crystalline)
Me	Methyl(gruppe)
Mt	Metall(atom)
NMR	Magnetische Kernresonanz
P	Polymeres
Ph	Phenyl(gruppe)
SEC	Ausschlusschromatographie
THF	Tetrahydrofuran
UV	Ultraviolett

## SYMBOLE

Symbole folgen im Allgemeinen den Empfehlungen der IUPAC-Kommissionen.

A	Absorptionsvermögen ( $A = \lg(I_0/I) = \lg(1/\tau)$ ); früher: Extinktion
A	Fläche
A	Helmholtz-Energie ( $A = U - TS$ ); früher: Freie Energie
$A^\ddagger$	Aktionskonstante (in $k = A^\ddagger \cdot \exp(-E^\ddagger/RT)$ )
$A_2$	Zweiter (thermodynamischer) Virialkoeffizient; $A_3$ = dritter Virialkoeffizient
$a$	Thermodynamische Aktivität
$a$	Linearer Absorptionskoeffizient ( $a = (1/L) \lg(I_0/I)$ )
$a_T$	Verschiebungsfaktor in der WLF-Gleichung
$b$	Bindungslänge; $b_{\text{eff}}$ = effektive Bindungslänge
$C$	Zahlenkonzentration (Anzahl Einheiten pro totales Volumen); siehe auch $c$
$C$	Übertragungskonstante (immer mit Index, z.B. $C_s$ bei einem Regler)
$C$	Wärmekapazität (meist in J/K); $C_m$ = molare Wärmekapazität (z.B. in J/(mol K))
$C$	Elektrische Kapazität
$C_N$	Charakteristisches Verhältnis in der Knäuelstatistik; $C_\infty$ = charakteristisches Verhältnis bei unendlich hoher Molmasse)
$C_p$	Wärmekapazität bei konstantem Druck
$C_{tr}$	Übertragungskonstante bei Polyreaktionen ( $C_{tr} = k_{tr}/k_p$ )
$c$	Spezifische Wärmekapazität (meist in J/(g K)); $c_p$ = isobare spezifische Wärmekapazität; $c_V$ = isochore spezifische Wärmekapazität. Früher: spezifische Wärmekapazität
$c$	Massekonzentration (= (Masse Gelöstes)/(Volumen Lösung), "Gewichtskonzentration". IUPAC schlägt für diese Grösse den Namen "Massedichte" und das Symbol $\rho$ vor, was jedoch zu Verwechslungen mit dem gleichen IUPAC-Symbol für die "echte" Massedichte (= (Masse Substanz)/(Volumen Substanz)) führt. Bei der üblichen "Dichte" beziehen sich Masse und Volumen immer auf die gleiche Materie, bei der Massekonzentration jedoch auf zwei verschiedene Dinge (Masse Gelöstes pro Volumen Lösung). Nur bei reinen Substanzen werden Massekonzentration und Dichte identisch. Nach DIN 1304 kann man für andere Grössen als die "echte" Dichte auf andere Buchstaben ausweichen.
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$\hat{c}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum oder Schallgeschwindigkeit (je nach Kapitel)

<i>D</i>	Diffusionskoeffizient; $D_{\text{rot}}$ = Rotationskoeffizient
<i>D</i>	Zugnachgiebigkeit
<i>d</i>	Durchmesser von kompakten Teilchen (Kugeln, Stäbchen, Scheibchen)
<i>d</i>	Dimensionalität
<i>E</i>	Energie
<i>E</i>	Elastizitätsmodul (Young-Modul)
<i>E</i>	Elektrische Feldstärke
<i>e</i>	Elementarladung
<i>e</i>	Parameter in der $Q,e$ -Copolymerisationsgleichung
<i>e</i>	Kohäsionsenergiedichte
<i>F</i>	Kraft
<i>f</i>	Bruchteil (soweit nicht spezifiziert als Stoffmengenanteil (= "Molenbruch") $x$ , Massenanteil ("Massenbruch") $w$ , Volumenanteil (Volumenbruch") $\phi$ , usw.)
<i>f</i>	Funktionalität (falls Verwechslungsgefahr: $f_0$ )
<i>G</i>	Gibbs-Energie ( $G = H - TS$ ); früher: Freie Enthalpie
<i>G</i>	Schermodul, $G'$ = Scherspeichermodul, $G_N^0$ = Plateau-Modul
<i>G</i>	Anteil des statistischen Gewichtes ( $G_i = g_i / \sum_i g_i$ )
<i>G</i>	Elektrischer Leitwert
<i>g</i>	Erdbeschleunigung
<i>g</i>	Statistisches Gewicht (IUPAC empfiehlt $k$ , was jedoch wegen der vielen anderen Bedeutungen von $k$ problematisch ist und ferner den Gebrauch von $K$ als Symbol für den Anteil des statistischen Gewichtes (statt $G$ ) ausschliesst.
<i>g</i>	Parameter für das Verhältnis der Dimensionen verzweigter Makromoleküle zu denen unverzweigter gleicher Masse (= Verzweigungsindex)
<i>H</i>	Höhe
<i>H</i>	Enthalpie
<i>h</i>	Höhe
<i>h</i>	Planck-Konstante ( $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J s)
<i>h</i>	Verzweigungsindex aus hydrodynamischen Messungen
<i>I</i>	Elektrische Stromstärke
<i>I</i>	Intensität
<i>i</i>	Strahlungsintensität eines Moleküls
<i>i</i>	Laufzahl ( $i$ -te Komponente usw.)
<i>J</i>	Fluss (von Masse, Volumen, Energie usw.)
<i>J</i>	Schernachgiebigkeit
<i>K</i>	Allgemeine Konstante
<i>K</i>	Gleichgewichtskonstante
<i>K</i>	Kompressionsmodul
<i>k</i>	Geschwindigkeitskonstante chemischer Reaktionen
$k_B$	Boltzmann-Konstante ( $k_B = R/N_A = 1,380\ 658 \cdot 10^{-23}$ J K <sup>-1</sup> )

- L* Länge.  $L_{\text{cont}}$  = Konturlänge (Länge der physikalisch maximal gestreckten Kette);  $L_K$  = Länge eines Kuhn-Segmentes;  $L_{\text{kette}}$  = echte (historische) Konturlänge (= Zahl der Bindungen mal Länge der Valenzbindungen);  
 $L_{\text{ps}}$  = Persistenzlänge,  $L_{\text{seg}}$  = Segmentlänge
- L* Phänomenologischer Koeffizient
- l* Länge
- M* Molmasse (physikalische Einheit Masse/Stoffmenge, z.B. g/mol)
- $M_r$  Relative Molmasse = relative Molekülmasse = "Molekulargewicht" (physikalische Einheit 1 = "dimensionslos")
- m* Masse
- N* Zahl
- $N_A$  Avogadro-Konstante ( $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )
- n* Stoffmenge einer Substanz (in mol); früher: Molzahl
- n* Brechungsindex
- P* Permeationskoeffizient ( $P = DS$ )
- P* Leistung
- P* Perrin-Faktor
- p* Wahrscheinlichkeit (E: probability)
- p* Druck
- p* Reaktionsausmass (z.B.  $p_A$  = Umsatz an Gruppen A)
- p* Anzahl konformativer Repetiereinheiten pro Helixwindung
- p* Dipolmoment
- Q* Elektrizitätsmenge
- Q* Wärme
- Q* Parameter in der  $Q,e$ -Copolymerisationsgleichung
- Q* Polymolekularitätsindex, z.B.  $Q = \overline{M}_w/\overline{M}_n$
- Q* Wechselweise verwendeter Hilfsparameter für kompliziertere physikalische Grössen, die nur in dem betreffenden Unterkapitel vorkommen
- q* Ladung eines Ions
- q* Wechselweise verwendeter Hilfsparameter für kompliziertere physikalische Grössen, die nur in dem betreffenden Unterkapitel vorkommen
- R* Allgemeine Gaskonstante ( $R = 8,314 \text{ 510 J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )
- R* Elektrischer Widerstand
- R* Dichroitisches Verhältnis
- R* Reaktionsgeschwindigkeit, z.B.  $R_p$  = Polymerisationsgeschwindigkeit
- R* Radius. Die jeweiligen Indices bedeuten: D = aus Diffusionsmessungen (Stokes-Radius); eq = bei äquivalenter Kugel (aus den äusseren Abmessungen); sph = für äquivalente Kugeln; H = hydrodynamischer Wert; S = aus Sedimentation; v = aus der Viskosität verdünnter Lösungen (Einstein-Radius).
- $R_\theta$  Rayleigh-Verhältnis der Streuintensitäten
- r* Radius

$r$	Fadenendenabstand. $r_{\text{cont}}$ = konventionelle Konturlänge (= Abstand der Fadenenden einer Kette in all-trans-Konformation)
$r$	Copolymerisationsparameter
$r_0$	Anfangsverhältnis der Stoffmengen an Gruppen bei der Polykondensation
$S$	Entropie
$S$	Löslichkeitskoeffizient
$S$	Sedimentationskoeffizient (in der Literatur als $s$ , was jedoch leicht mit dem gleichen Symbol $s$ für den Trägheitsradius verwechselt werden kann)
$s$	Trägheitsradius (IUPAC)
$s$	Selektivitätskoeffizient (osmotischer Druck)
$T$	Temperatur, und zwar sowohl in K (physikalische Gleichungen) als auch in °C (beschreibend). IUPAC empfiehlt für Celsius-Temperaturen entweder $t$ (was mit dem gleichen Symbol für die Zeit verwechselt werden kann) oder $\theta$ (was fälschlicherweise meist mit dem in der makromolekularen Wissenschaft für die Theta-Temperatur verwendeten Symbol $\Theta$ identifiziert wird). DIN schlägt für Celsius-Temperaturen die Symbole $t$ oder $\vartheta$ vor. $t$ ist jedoch leicht mit dem gleichen Symbol für die Zeit zu verwechseln. Missverständnisse beim Verwenden von $T$ für Kelvin- und Celsius-Temperaturen sind bei Angabe der physikalischen Einheiten nicht möglich. In physikalischen Gleichungen ist ausschliesslich $T$ in K zu verwenden.
$t$	Zeit
$t$	Rotationswinkel um die Helixachse
$U$	Innere Energie
$U$	Elektrische Spannung
$u$	Umsatz an Monomermolekülen ( $p$ = Umsatz an Gruppen; $y$ = Ausbeute an Substanz)
$u$	Ausgeschlossenes Volumen
$V$	Volumen
$V$	Elektrisches Potential
$v$	Spezifisches Volumen
$v$	Geschwindigkeit (lineare Geschwindigkeit $v = dL/dt$ )
$W$	Arbeit (E: work)
$w$	Massenanteil (Massenbruch, "Gewichtsbruch")
$X$	Polymerisationsgrad = Anzahl der Monomereinheiten pro Molekül
$X$	Elektrischer Widerstand
$x$	Stoffmengenanteil ("Molenbruch"), z.B. $x_A$ = Stoffmengenanteil an A
$x_{\text{br}}$	Verzweigungsgrad
$Y$	Brechungsindexinkrement (= $dn/dc$ )
$Y$	Polymerisationsgrad = Anzahl der Reptiereinheiten pro Molekül
$y$	Ausbeute an Substanz (E: yield)

Z	Stosszahl
Z	z-Anteil ( $Z_i = z_i / \sum_i z_i$ )
z	z-statistisches Gewicht
z	Koordinationszahl, Anzahl der Nachbarn
z	Dissymmetrie (Lichtstreuung)
z	Parameter in der Theorie des ausgeschlossenen Volumens
$\alpha$	Winkel, insbesondere Rotationswinkel der optischen Aktivität
$\alpha$	Linearer Aufweitungsfaktor von Substanzen oder Knäueln ( $\alpha_D$ bei Bezug auf Diffusionsmessungen, $\alpha_h$ bei Bezug auf hydrodynamische Abmessungen (allgemein), $\alpha_r$ bei Bezug auf den Fadenendenabstand, $\alpha_s$ bei Bezug auf den Trägheitsradius $s$ , $\alpha_v$ bei Bezug auf die Viskosität verdünnter Lösungen).
$\alpha$	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient (in der Literatur oft als $\beta$ bezeichnet, dann mit $\alpha$ für den kubischen thermischen Ausdehnungskoeffizienten)
$\alpha$	Kristallinitätsgrad (jeweils mit Index für die entsprechende Methode, z.B. X bei Röntgenmessungen)
$\alpha$	Elektrische Polarisierbarkeit eines Moleküls
$[\alpha]$	"Spezifische" optische Drehung
$\beta$	Winkel
$\beta$	Druckkoeffizient
$\beta$	Kubischer Ausdehnungskoeffizient (in der Literatur oft als $\alpha$ bezeichnet, dann mit $\beta$ für den linearen Ausdehnungskoeffizienten)
$\beta$	Integral des ausgeschlossenen Volumens
$\Gamma_H$	Parameter der Vorzugssolvatation (Vorzugshydratation)
$\gamma$	Winkel
$\gamma$	Oberflächenspannung, Grenzflächenenergie
$\gamma$	Vernetzungsindex
$\dot{\gamma}$	Geschwindigkeitsgefälle = Schergeschwindigkeit = Geschwindigkeitsgradient
$\delta$	Verlustwinkel
$\delta$	Löslichkeitsparameter
$\delta$	Chemische Verschiebung
$\varepsilon$	Lineare Dehnung [ $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$ ]
$\varepsilon$	Energie pro Molekül
$\varepsilon$	Erwartung
$\varepsilon_r$	Relative Permittivität (früher: Dielektrizitätskonstante)
$\zeta$	Verhältnis $R_h/R_s$ von hydrodynamischen Radien zu Trägheitsradien, z.B. $\zeta_{sph}$ bei Kugeln, $\zeta_{cn}$ bei Knäueln
$\eta$	Dynamische Viskosität, z.B. $\eta_0$ = Ruhe-Viskosität, $\eta_1$ = Viskosität des Lösungsmittels
$\eta_i$	Relatives Viskositätsinkrement ("spezifische Viskosität"), $\eta_i = (\eta - \eta_1)/\eta_1$
$\eta_{inh}$	Inhärente Viskosität, logarithmische Viskositätszahl, $\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/c$

$\eta_r$	Viskositätsverhältnis ("relative Viskosität"), $\eta_r = \eta/\eta_1$
$\eta_{red}$	Reduzierte Viskosität, Viskositätszahl, $\eta_{red} = (\eta - \eta_1)/(\eta_1 c)$
$\eta_{sp}$	Spezifische Viskosität (= $(\eta - \eta_0)/\eta_0$ ). (IUPAC schlägt für diese Größe den Namen relatives Viskositätsinkrement und das Symbol $\eta_i$ vor; das Symbol ist leicht mit dem Symbol $\eta_i$ für die Viskosität der Substanz $i$ zu verwechseln.
$[\eta]$	Grenzviskositätszahl (Staudinger-Index, intrinsic viscosity), $\lim_{c \rightarrow 0} \eta_{red} \equiv [\eta]$ ; die Grenzviskositätszahl wird in DIN 1342 $J_0$ genannt.
$\Theta$	Charakteristische Temperatur, insbesondere Theta-Temperatur
$\theta$	Winkel, insbesondere Torsionswinkel (makromolekulare Konvention)
$\vartheta$	Winkel, insbesondere Phasenwinkel bzw. Torsionswinkel (organisch-chemische Konvention)
$\kappa$	Isotherme (kubische) Kompressibilität
$\kappa$	Enthalpischer Wechselwirkungsparameter in der Theorie der Lösungen
$\Lambda$	Achsenverhältnis bei Stäbchen (Länge/Durchmesser) oder Rotationsellipsoiden (Hauptachse/Nebenachse)
$\lambda$	Wellenlänge ( $\lambda_0$ = Wellenlänge des Einfallslichtes)
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	Verstreckungsverhältnis, $\lambda = L/L_0$
$\mu$	Chemisches Potential
$\mu$	Moment (Verteilungen)
$\mu$	Dipolmoment
$\mu$	Poisson-Verhältnis
$\nu$	Moment (Verteilungen), bezogen auf einen Referenzwert
$\nu$	Kinetische Kettenlänge
$\nu$	Frequenz
$\nu$	Effektive Stoffmengenkonzentration an Netzketten
$\nu$	Geschwindigkeit
$\Xi$	Zustandsumme
$\xi$	Reibungskoeffizient (IUPAC empfiehlt $f$ , was jedoch mit dem gleichen Symbol für den Anteil ("Fraktion") kollidiert.
$\Pi$	Osmotischer Druck
$\pi$	Mathematische Konstante $\pi$
$\rho$	Dichte (= Masse/Volumen der jeweils gleichen Materie), z.B. Masse Substanz A pro Volumen Substanz A. $\rho$ wird von IUPAC auch für andere "Dichten" verwendet, z.B. für die Zahlenkonzentration $C$ ("Zahldichte").
$\rho$	Elektrischer Volumenwiderstand
$\sigma$	Mechanische Spannung; $\sigma_{11}$ = Normalspannung, $\sigma_{21}$ = Scherspannung
$\sigma$	Standardabweichung

$\sigma$	Behinderungparameter (sterischer Faktor)
$\sigma$	Kooperativität
$\sigma$	Elektrische Leitfähigkeit
$\zeta$ $\overline{M}_n$	Kopplungsgrad von Ketten bei Schulz-Zimm-Verteilungen; $\zeta = \overline{M}_n / (\overline{M}_w - \overline{M}_n)$
$\tau$	Bindungswinkel (Valenzwinkel)
$\tau$	Relaxationszeit
$\tau$	Scherspannung (= $\sigma_{21}$ )
$\tau_i$	Innere Durchlässigkeit (Transmission, Durchlässigkeitsfaktor)
$\Phi$	Flory-Parameter; $\Phi_\theta$ = Flory-Konstante (Theta-Zustand)
[ $\Phi$ ]	"Molare" optische Drehung
$\phi$	Volumenanteil (Volumenbruch)
$\phi$	Winkel
$\varphi(r)$	Potential zwischen zwei durch einen Abstand $r$ getrennten Segmenten
$\chi$	Wechselwirkungsparameter bei der Theorie der Lösungen (Flory-Huggins-Parameter)
$\Psi$	Simha-Faktor für Ellipsoide
$\psi$	Entropischer Wechselwirkungsfaktor in der Theorie der Lösungen
$\Omega$	Winkel
$\Omega$	Thermodynamische Wahrscheinlichkeit
$\Omega$	Schiefe einer Verteilung
$\omega$	Winkelfrequenz, Winkelgeschwindigkeit

## Inhaltsverzeichnis

Weiterführende Literatur und Quellennachweise befinden sich jeweils am Kapitelende.

Motto.....	V
Vorworte.....	VII
Verzeichnis der Abkürzungen .....	X
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Struktur und Eigenschaften von Polymeren .....</b>	<b>8</b>
2.1. Chemische Struktur .....	8
2.1.1. Begriffe .....	8
2.1.2. Polymernamen .....	9
2.1.3. Konstitution .....	10
Strukturbezogene Begriffe .....	11
Verfahrensbezogene Begriffe .....	13
Molmassen .....	14
2.1.4. Konfiguration .....	16
2.2. Physikalische Struktur .....	19
2.2.1. Mikrokonformationen .....	19
2.2.2. Makrokonformationen .....	19
2.2.3. Morphologie .....	20
2.2.4. Lösungen, Schmelzen und Gläser .....	21
2.3. Physikalische Eigenschaften .....	22
2.3.1. Thermische Eigenschaften .....	23
2.3.2. Mechanische Eigenschaften .....	24
2.3.3. Elektrische Eigenschaften .....	25
<b>3. Rohstoffe .....</b>	<b>26</b>
3.1. Einführung .....	26
3.1.1. Natürliche Rohstoffe .....	26
3.1.2. Synthetische Polymere .....	28
3.2. Energie .....	29
3.2.1. Energieträger .....	29
3.2.2. Produktion .....	30
3.2.3. Verbrauch an Primärenergie .....	31
3.2.4. Reichweite .....	34
3.2.5. Ökologie .....	36
3.3. Erdgas und Synthesegas .....	38
3.3.1. Typen .....	38
3.3.2. Produktion .....	39
3.3.3. Synthesegas .....	41
3.3.4. Erd- und Synthesegas als Chemierohstoff .....	42
3.4. Erdöl .....	43
3.4.1. Petrochemikalien .....	43



3.4.2.	Rohöl .....	44
3.4.3.	Verarbeitung des Rohöls .....	47
3.4.4.	Vorprodukte für Polymere .....	49
3.5.	Ölschiefer .....	54
3.6.	Ölsande, Bitumen und Asphalt .....	55
3.7.	Kohlen .....	56
3.7.1.	Chemische Struktur .....	56
3.7.2.	Förderung und Vorräte .....	57
3.7.3.	Steinkohle als Chemierohstoff .....	58
3.7.4.	Braunkohle .....	60
3.8.	Holz .....	60
3.8.1.	Struktur, Produktion und Verwendung .....	60
3.8.2.	Naturholz .....	62
3.8.3.	Pressholz .....	63
3.8.4.	Sperrholz .....	64
3.8.5.	Polymerholz .....	64
3.8.6.	Weichgemachtes Holz .....	65
3.8.7.	Holzschliff .....	66
3.8.8.	Zellstoff .....	66
3.8.9.	Holzverzuckerung .....	67
3.8.10.	Holzvergasung .....	68
3.9.	Lignine .....	69
3.10.	Naturharze .....	70
3.11.	Fette und fette Öle .....	73
3.12.	Biomasse .....	75
	Anhang zu Kap. 3: Bruttosozialprodukt und Bruttoinlandprodukt .....	77
<b>4.</b>	<b>Technische Synthesen .....</b>	<b>82</b>
4.1.	Polyreaktionen .....	82
4.1.1.	Monomere für Polymere .....	82
4.1.2.	Einteilung der Polyreaktionen .....	83
4.1.3.	Thermodynamische Voraussetzungen .....	87
4.1.4.	Elementarreaktionen .....	87
4.1.5.	Polyadditionen und Polykondensationen .....	90
4.1.6.	Ionische Polymerisationen .....	92
4.1.7.	Polyinsertionen .....	93
4.1.8.	Radikalische Polymerisationen .....	94
4.1.9.	Copolymerisationen .....	97
4.1.10.	Polymertransformationen .....	98
4.2.	Technische Verfahren .....	100
4.2.1.	Übersicht .....	100
4.2.2.	Katalysatoren und Initiatoren .....	101
4.2.3.	Polymerisation in Masse .....	103
4.2.4.	Polymerisation in Suspension .....	105
4.2.5.	Polymerisation in Emulsion .....	108
	Phänomene .....	108

	Polymerisationsgeschwindigkeit .....	112
	Partikel-Bildung .....	114
	Produkteigenschaften .....	115
4.2.6.	Polyreaktionen in Lösung .....	116
4.2.7.	Polymerisation in Fällungsmitteln .....	118
4.2.8.	Polymerisationen in Gasphasen .....	119
4.3.	Reaktoren .....	121
4.3.1.	Viskositäten .....	122
4.3.2.	Reaktortypen .....	124
	Ideale Reaktoren .....	124
	Rührkessel (BR) .....	126
	Strömungsrohre (CPFR) .....	127
	Kaskaden .....	128
	Kontinuierliche Rührkesselreaktoren (CSTR) .....	128
4.3.3.	Rührer .....	129
	Typen .....	129
	Rührleistung .....	130
	Segregierte Reaktoren .....	131
4.4.	Aufbereitung von Polymeren .....	135
4.5.	Wirtschaftliche Aspekte .....	136
4.5.1.	Energie-Aufwand .....	136
4.5.2.	Kapazitäten .....	137
4.5.3.	Kosten und Preise .....	137
<b>5.</b>	<b>Kohlenstoff-Ketten .....</b>	<b>143</b>
5.1.	Kohlenstoffe .....	143
5.1.1.	Diamant .....	143
5.1.2.	Fullerene .....	144
5.1.3.	Graphit .....	146
5.1.4.	Kohlenstoff- und Graphitfasern .....	147
5.1.5.	Glaskohlenstoff .....	149
5.1.6.	Russe .....	149
5.1.7.	Holzkohle .....	151
5.1.8.	Aktivkohle .....	151
5.2.	Poly(olefin)e .....	151
5.2.1.	Bezeichnungen .....	151
5.2.2.	Poly(methylen) .....	152
5.2.3.	Poly(ethylen)e .....	153
	Vorkommen .....	153
	Einteilung der industriellen Poly(ethylen)e .....	153
	PE-LD .....	155
	PE-HD .....	157
	PE-LLD .....	160
	mPE-LLD .....	161
	Eigenschaften .....	162
5.2.4.	Modifizierte Poly(ethylen)e .....	163

5.2.5.	Ethen-Copolymere .....	164
	Copolymere mit 1-Olefinen oder Dienen .....	164
	Copolymere mit Vinylmonomeren .....	165
	Copolymere mit Acrylverbindungen .....	166
5.2.6.	Poly(propylen)e .....	167
	Kapazitäten und Geschichte .....	167
	Poly(propylen)e durch Übergangsmetall-Katalysatoren ..	167
	Metallocen-Poly(propylen)e .....	170
	Ataktische Poly(propylen)e .....	171
	Syndiotaktische Poly(propylen)e .....	171
	Copolymere mit Kohlenmonoxid .....	172
5.2.7.	Poly(1-buten) .....	172
5.2.8.	Poly(4-methyl-1-penten) .....	172
5.2.9.	Höhere Poly( $\alpha$ -olefin)e .....	173
5.2.10.	Poly(isobutylen) .....	174
5.3.	Poly(dien)e .....	175
5.3.1.	Übersicht .....	175
5.3.2.	Poly(butadien)e .....	176
	Anionische Polymerisationen .....	177
	Alfin-Polymerisationen .....	177
	Radikalische Polymerisationen zu SBR .....	178
	Radikalische Copolymerisationen zu NBR .....	179
	Ziegler-Natta-Polymerisationen .....	179
5.3.3.	Poly(isopren)e .....	180
	Natürliche Polyprene .....	180
	Synthetische Poly(isopren)e .....	182
	Derivate .....	184
5.3.4.	Poly(2,3-dimethylbutadien) .....	185
5.3.5.	Poly(chloropren) .....	185
5.4.	Poly(cycloolefin)e .....	186
5.4.1.	Übersicht .....	186
5.4.2.	Poly(pentenamer) .....	187
5.4.3.	Norbornen-Polymere .....	187
5.4.4.	Cycloolefin-Copolymere .....	189
5.4.5.	Poly(dicyclopentadien) .....	189
5.4.6.	Poly(octenamer) .....	190
5.4.7.	Poly(acetylen)e .....	190
5.5.	Aromatische Poly(kohlenwasserstoffe) .....	191
5.5.1.	Poly(phenylen)e .....	191
	Verzweigte Poly(phenylen)e .....	192
	Lineare Poly(phenylen)e .....	192
5.5.2.	Poly( <i>p</i> -xylylen) .....	194
5.5.3.	Phenolharze .....	195
	Säurekatalyse .....	196
	Basenkatalyse .....	197
	Eigenschaften .....	197

5.5.4.	Poly(armethylen)e .....	199
5.5.5.	Poly(benzocyclobuten)e .....	199
5.6.	Andere Poly(kohlenwasserstoffe) .....	201
5.6.1.	Cumaron-Inden-Harze .....	201
5.6.2.	Harzöl-Harze .....	201
5.6.3.	Pinen-Harze .....	201
5.6.4.	Polymere aus ungesättigten Naturölen .....	202
5.7.	Poly(vinylverbindungen) .....	202
5.7.1.	Poly(styrol) .....	203
	Ataktische Homopolymere .....	203
	Stereoreguläre Poly(styrol)e .....	204
	Copolymere .....	205
5.7.2.	Substituierte Poly(styrol)e .....	206
5.7.3.	Poly(vinylacetat) .....	207
5.7.4.	Poly(vinylalkohol) .....	208
5.7.5.	Poly(vinylacetal)e .....	209
5.7.6.	Poly(vinylether) .....	209
5.7.7.	Poly( <i>N</i> -vinylverbindungen) .....	210
	Poly( <i>N</i> -vinylcarbazol) .....	211
	Poly( <i>N</i> -vinylpyrrolidon) .....	211
5.8.	Poly(halogenkohlenwasserstoffe) .....	212
5.8.1.	Poly(vinylchlorid) .....	212
	Homopolymerisationen .....	212
	Struktur .....	213
	Eigenschaften .....	214
	Derivate .....	216
	Copolymere .....	216
5.8.2.	Poly(vinylidenchlorid) .....	216
5.9.	Fluor enthaltende Polymere .....	217
5.9.1.	Poly(tetrafluorethylen) .....	217
	Polymerisation .....	217
	Verarbeitung und Eigenschaften .....	218
5.9.2.	Copolymere des Tetrafluorethens .....	219
5.9.3.	Poly(chlortrifluorethylen) .....	220
5.9.4.	Poly(vinylfluorid) .....	220
5.9.5.	Poly(vinylidenfluorid) .....	220
5.10.	Poly(acrylverbindungen) .....	221
5.10.1.	Poly(acrylsäure) .....	221
5.10.2.	Poly(acrylsäureester) .....	222
5.10.3.	Poly(acrolein) .....	224
5.10.4.	Poly(acrylnitril) .....	224
5.10.5.	Poly(acrylamid) .....	225
5.10.6.	Poly( $\alpha$ -cyanacrylat)e .....	226
5.10.7.	Poly(methylmethacrylat) .....	226
	Polymerisation in Masse .....	227
	Polymerisation in Lösung .....	228

	Polymerisation in Suspension .....	228
5.10.8.	Poly(2-hydroxyethylmethacrylat) .....	229
5.10.9.	Poly(methacrylimid) .....	229
5.10.10.	Poly(methacrylnitril) .....	229
5.11.	Poly(allylverbindungen) .....	230
5.12.	Aliphatische Polyketone .....	231
<b>6.</b>	<b>Kohlenstoff-Sauerstoff-Ketten</b> .....	<b>238</b>
6.1.	Übersicht .....	238
6.2.	Poly(acetal)e .....	238
6.2.1.	Übersicht .....	238
6.2.2.	Poly(oxymethylen)e .....	239
	Monomere .....	239
	Poly(formaldehyd)e .....	240
	Acetal-Copolymere .....	241
	Stabilisierung von Acetal-Copolymeren .....	243
	Eigenschaften .....	243
6.2.3.	Poly(acetaldehyd) .....	244
6.2.4.	Poly(flural) .....	244
6.2.5.	Poly(chloral) .....	245
6.2.6.	Poly(phthalaldehyd) .....	246
6.2.7.	Poly(diphenolformal)e .....	246
6.2.8.	Poly(1,3-dioxolan) .....	246
6.2.9.	Poly(aceton) .....	247
6.3.	Polyether .....	248
6.3.1.	Poly(oxyethylen)e .....	248
6.3.2.	Poly(propylenoxid) .....	248
6.3.3.	Poly(epichlorhydrin) .....	249
6.3.4.	Poly[1,2-di(chlormethyl)ethylenoxid] .....	250
6.3.5.	Phenoxy-Harze .....	250
6.3.6.	Epoxid-Harze .....	251
	Typen .....	251
	Synthesen .....	252
	Härtung .....	253
6.3.7.	Poly(tetrahydrofuran) .....	255
6.3.8.	Furan-Harze .....	255
6.3.9.	Polyphenylenoxide .....	255
	Synthese .....	256
	Eigenschaften .....	257
6.4.	Polyketone .....	258
6.4.1.	Poly(kohlensuboxid) .....	258
6.4.2.	Polyaryletherketone .....	259
6.5.	Aliphatische AB-Polyester .....	261
6.5.1.	Poly( $\alpha$ -hydroxyessigsäure) .....	262
6.5.2.	Poly(lactid) .....	262
6.5.3.	Poly(hydroxypropionsäure)n .....	263

6.5.4.	Pol(hydroxyfettsäure)n .....	264
6.5.5.	Poly(pivalolacton) .....	267
6.5.6.	Poly( $\beta$ -malonsäureester) .....	267
6.5.7.	Poly( $\epsilon$ -caprolacton) .....	268
6.5.8.	Anderer Poly( $\omega$ -hydroxyalkanoat)e .....	268
6.6.	Aliphatische AA/BB-Polyester .....	269
6.6.1	Poly(alkylencarbonat)e .....	269
6.6.2.	Anderer Poly(alkylenalkanoat)e .....	270
6.6.3.	Alkydharze .....	270
6.7.	Ungesättigte Polyester .....	271
6.8.	Aromatische Polyester .....	272
6.8.1.	Polycarbonate .....	272
6.8.2.	Poly( <i>p</i> -hydroxybenzoat)e .....	275
6.8.3.	Poly(ethylenoxybenzoat) .....	277
6.8.4.	Poly(ethylenterephthalat) .....	277
6.8.5.	Poly(1,4-bismethylencyclohexanterephthalat) .....	279
6.8.6.	Poly(trimethylenterephthalat) .....	279
6.8.7.	Poly(butylenterephthalat) .....	279
6.8.8.	Thermoplastische Polyester-Elastomere .....	280
6.8.9.	Poly(alkylenaphthalat)e .....	281
6.8.10.	Polyarylate .....	281
6.9.	Polyorthoester .....	282
6.10.	Polyanhydride .....	283
<b>7.</b>	<b>Polysaccharide .....</b>	<b>287</b>
7.1.	Saccharide .....	287
7.1.1.	Übersicht .....	287
7.1.2.	Einfache Zucker .....	287
7.1.3.	Nomenklatur .....	292
7.1.4.	Biosynthese .....	294
7.1.5.	Wirtschaftliche Bedeutung .....	294
7.2.	Poly( $\alpha$ -glucose)n .....	295
7.2.1.	Übersicht .....	295
7.2.2.	Stärke .....	297
	Vorkommen .....	297
	Gewinnung .....	297
	Verwendung .....	298
	Modifikation von Stärken .....	299
	Stärke als Rohstoff .....	300
	Molmassen .....	300
	Amylose .....	301
	Amylopektin .....	303
	Physikalische Struktur der Stärkekörner .....	304
7.2.3.	Glycogen .....	305
7.2.4.	Dextrine .....	306
7.2.5.	Dextrane .....	307