



# Makromoleküle

**Band 4**

**Anwendungen von Polymeren**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

Hans-Georg Elias

Michigan Molecular Institute

 **WILEY-VCH**

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

Hans-Georg Elias

# **Makromoleküle**

**Band 4**  
**Anwendungen von**  
**Polymeren**

 **WILEY-VCH**

Hans-Georg Elias

# **Makromoleküle**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

Band 1: Chemische Struktur und Synthesen

Band 2: Physikalische Struktur und Eigenschaften

Band 3: Industrielle Polymere und Synthesen

Band 4: Anwendungen von Polymeren

# **Makromoleküle**

**Band 4**

**Anwendungen von Polymeren**

Sechste, vollständig überarbeitete Auflage

Hans-Georg Elias

Michigan Molecular Institute

 **WILEY-VCH**

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: 2003

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 3-527-29962-9

© 2003 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

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 Datenverarbeitungsmaschinen, 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: Litges & Dopf, Heppenheim

Printed in the Federal Republic of Germany.

**Was die Herren nicht beweisen können,  
nennen sie Praxis  
und was sie nicht widerlegen können,  
nennen sie Theorie.**

**L. Bamberger  
Reden im Reichstag**

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

## Vorwort zu Band IV der sechsten Auflage

Makromoleküle werden selten wegen ihrer besonders schönen Struktur oder eleganten Synthese hergestellt, sondern wegen ihrer Nützlichkeit als makromolekulare Stoffe, d.h. Polymere. Der vorliegende vierte Band von "Makromoleküle" bespricht daher die Anwendung von Polymeren *per se* und als Rohstoffe für Kunststoffe, Fasern, Elastomere, Packmittel, Überzüge u.a. Die Ausführungen konzentrieren sich auf die Anwendung als Materialien. Anwendungen in der Medizin und Ernährung wurden ausgelassen, da sie den Rahmen dieses Werkes bei weitem sprengen würden.

Nach einer kurzen Einführung (Kap. 1) werden, damit der Band IV auch allein benutzt werden kann, zunächst die wichtigsten Begriffe der makromolekularen Chemie und Physik aufgeführt (Kap. 2). Für eine Vertiefung und seltener verwendete Begriffe sind die Bände I (Chemische Struktur und Synthesen), II (Physikalische Struktur und Eigenschaften) und III (Industrielle Polymere und Synthesen) zu konsultieren.

Als polymere Materialien werden weit überwiegend Stoffsysteme verwendet und nur selten die reinen Polymeren selbst. Kap. 3 schildert daher die in Polymersystemen verwendeten Hilfsstoffe (Farbstoffe, Füllstoffe, Verarbeitungshilfsmittel usw.). In Kap. 4 werden die meisten Verarbeitungsverfahren zusammengefasst und in Kap. 5 die technisch wichtigsten Prüfverfahren. Die wissenschaftlichen Methoden zur Aufklärung chemischer Strukturen wurden bereits in Band I geschildert und diejenigen für physikalische Strukturen in Band II.

Die nächste grosse Untergruppe behandelt die grundlegenden Werkstofftypen, nämlich Fasern (Kap. 6), Elastomere (Kap. 7) und Kunststoffe (Kap. 8). Diese nicht so übliche Reihenfolge wurde aus zwei Gründen gewählt. Einmal spiegelt sie die historische Reihenfolge wider, in der diese Werkstoffe erstmals verwendet wurden. Zweitens erlaubt sie einen nahtlosen Übergang von den in Kap. 8 beschriebenen Basispolymeren zu den gefüllten und verstärkten Kunststoffen (Kap. 9), speziell den faserverstärkten, und den in Kap. 10 diskutierten Polymermischungen, speziell den durch Kautschuk schlagzäh gemachten.

Die letzte Kapitelgruppe befasst sich dann mit speziellen Anwendungen von Polymeren als Packmittel (Kap. 11), in der Elektro- und Elektronikindustrie (Kap. 12), in der Optik und Optoelektronik (Kap. 13), als Lösungen und Gele (Kap. 14) sowie als Überzüge und Klebstoffe (Kap. 15).

Bei allen Kapiteln wurde besonderer Wert auf die Definitionen technischer Begriffe gelegt, speziell wenn deutsche und angelsächsische Terminologien voneinander abweichen. Aus dem gleichen Grunde wurden den meisten deutschen Fachbegriffen auch die angelsächsischen Fachausdrücke beigegeben.

Die Beschreibungen sind im Wesentlichen qualitativ und halbquantitativ, was in der Regel durch die Komplexität technischer Werkstoffe bedingt ist. Wenn immer möglich, habe ich jedoch versucht, den ursprünglichen Lehrbuchstil beizubehalten, was auch beinhaltet, dass nicht jede Zahl und jede Aussage mit der Originalliteratur belegt ist; derartige Referenzen lassen sich umfassender (aber auch nicht immer vollständig) den Bibliographien entnehmen, welche den einzelnen Kapiteln folgen.

Es sind nun fast 40 Jahre, dass ich als junger Professor begann, die ersten Kapitel der 1. Auflage dieses Werkes zu skizzieren, und über 30 Jahre, dass die 1. Auflage erschien. In diesen Jahren, "When Polymer Science Looked Easy" (W. H. Stockmayer, B. H. Zimm,

Ann.Rev.Chem. **35** (1984) 1), war es noch möglich, sich über viele Teilaspekte der Polymerwissenschaft und -technologie mehr oder weniger gut zu informieren. Vor 20 Jahren schaffte ich es noch, nach der Tagesarbeit als Forscher, Lehrer und CEO des MMI am Abend noch alle in unserer Bibliothek neu eingetroffenen Polymerzeitschriften wenigstens diagonal durchzusehen. Heutzutage eine schiere Unmöglichkeit: im Jahr 2000 erschienen allein über 13 000 Artikel mit dem Wort „Polymer“ im Titel (S.Mayer, R.Zentel, M.Wilhelm, A.Greiner, Nachr.Chem. **50** (2002) 442; Macromol.Chem.Phys. **203** (2002) 1743), ganz zu schweigen von den ungleich mehr Arbeiten, die ihren Polymergehalt *nicht* im Titel anzeigen.

Während die Informationsflut anschwellt, trocknete die Zugänglichkeit zur Information immer mehr aus. Der persönliche Bezug von Fachzeitschriften ist aus Kostengründen praktisch nicht mehr möglich. Aus dem gleichen Grund reduzierten Universitäts- und Institutsbibliotheken ihre Subskriptionen. Am Wohnort des Verfassers löste eine weltweit tätige, mehrere Milliarden pro Jahr Umsatz machende Firma kurzerhand ihre wissenschaftliche Bibliothek auf. Eine noch grössere, am gleichen Ort ansässige Weltfirma ersetzte die meisten gedruckten Zeitschriften durch ihre elektronischen Versionen und das wissenschaftlich-technische Bibliothekspersonal durch Zeitarbeitskräfte, weil ja nunmehr angeblich alles vom Computer abgerufen werden kann.

Produktionszahlen und andere statistische Daten, die ein Werk wie dieses unbedingt enthalten sollte, sind vielfach nur noch gegen sehr teures Geld erhältlich. Verlage verstehen sich nicht mehr als Verleger von Büchern und Zeitschriften, sondern als Verkäufer von Informationen. Elektronisches Publizieren, anfänglich als preiswertes Verfahren zum schnellen Verbreiten von Informationen an eine grosse Zahl von Interessenten begrüsst, erwies sich als kostspielig und nicht so allgemein zugänglich. Und völlig ungeklärt ist, ob das in elektronischen Publikationen enthaltene Wissen, weil nur bei einem Vertreiber gespeichert, auch noch in 50, 100, 150 ... Jahren zugänglich sein wird ...

Midland, Herbst 2002

Hans-Georg Elias

## Aus dem Vorwort zur 1.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                                      |
| ∂ | partielles Differenzial        | 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

- $\sim$  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  
 α Exponent in der Grenzviskositätszahl/Molmasse-Beziehung  $[\eta] = K_v M^\alpha$   
 v Exponent in der Beziehung  $\langle s^2 \rangle^{1/2} = K_s M^v$   
 δ Exponent in der Beziehung  $D = K_D M^\delta$   
 ζ Exponent in der Beziehung  $S = K_S M^\zeta$

## 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-te</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  |
| O   | Oberfläche  |
| P   | Polymer   |
| p   | Polymerisation, insbesondere Wachstum (E: propagation)  |
| pol | Polymer (falls P missverständlich ist)  |
| 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>sphera</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 <i>block</i> )  |
| blend | Polymerblend (Polymermischung)   |
| br    | verzweigt (nicht spezifiziert; E: branched). IUPAC empfiehlt <i>sh-branch</i> =<br>kurzkettenverzweigt (E: short), <i>l-branch</i> = langkettenverzweigt; <i>f-branch</i> =<br>verzweigt mit einem Verzweigungspunkt der Funktionalität <i>f</i> |
| c     | ringförmig ("cyclisch"); IUPAC empfiehlt <i>cyclo</i>  |
| cb    | kammartig (IUPAC empfiehlt <i>comb</i> )   |
| 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)  |
| sipn  | semi-interpenetrierendes Netzwerk  |
| stat  | statistisch (mit un spezifizierter Verteilung)   |
| sr    | sternförmig (IUPAC empfiehlt <i>star</i> sowie <i>f-star</i> , wenn die Funktionalität des<br>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<br>Butylgruppe; die normale Butylgruppe wird nach IUPAC unlogischerweise<br><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 FÜR PHYSIKALISCHE GRÖSSEN

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 $k = A^\ddagger \exp(-E^\ddagger/RT)$ )   |
| $A_2$        | 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 Wärme  |
| $c$          | 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   |
| $F_{\text{B}}$ | Schlagzähigkeit (US); $F_{\text{B},n}$ = Kerbschlagzähigkeit (US)   |
| <i>f</i>       | Bruchteil (soweit nicht spezifiziert als Stoffmengenanteil (= "Molenbruch") $x$ ,<br>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<br>Bedeutungen von $k$ problematisch ist und ferner den Gebrauch von $K$ als<br>Symbol für den Anteil des statistischen Gewichtes (statt $G$ ) ausschliesst. |
| <i>g</i>       | Parameter für das Verhältnis der Dimensionen verzweigter Makromoleküle zu<br>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   |
| $k_{\text{B}}$ | Boltzmann-Konstante ( $k_{\text{B}} = R/N_{\text{A}} = 1,380\ 658 \cdot 10^{-23}$ J K <sup>-1</sup> )   |

|            |  |
|------------|--|
| <i>L</i>   | 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 |
| <i>L</i>   | Phänomenologischer Koeffizient   |
| <i>l</i>   | Länge  |
| <i>M</i>   | Molmasse (physikalische Einheit Masse/Stoffmenge, z.B. g/mol)  |
| $M_r$      | Relative Molmasse = relative Molekülmasse = "Molekulargewicht" (physikalische Einheit 1 = "dimensionslos")   |
| <i>m</i>   | Masse  |
| <i>N</i>   | Zahl   |
| $N_A$      | Avogadro-Konstante ( $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )  |
| <i>n</i>   | Stoffmenge einer Substanz (in mol); früher: Molzahl  |
| <i>n</i>   | Brechungsindex   |
| <i>P</i>   | Permeationskoeffizient ( $P = DS$ )  |
| <i>P</i>   | Leistung   |
| <i>P</i>   | Perrin-Faktor  |
| <i>p</i>   | Wahrscheinlichkeit (E: probability)  |
| <i>p</i>   | Druck  |
| <i>p</i>   | Reaktionsausmass (z.B. $p_A$ = Umsatz an Gruppen A)  |
| <i>p</i>   | Anzahl konformativer Repetiereinheiten pro Helixwindung  |
| <i>p</i>   | Dipolmoment  |
| <i>Q</i>   | Elektrizitätsmenge   |
| <i>Q</i>   | Wärme  |
| <i>Q</i>   | Parameter in der $Q,e$ -Copolymerisationsgleichung   |
| <i>Q</i>   | Polymolekularitätsindex, z.B. $Q = \bar{M}_w/\bar{M}_n$  |
| <i>Q</i>   | Wechselweise verwendeter Hilfsparameter für kompliziertere physikalische Grössen, die nur in dem betreffenden Unterkapitel vorkommen   |
| <i>q</i>   | Ladung eines Ions  |
| <i>q</i>   | Wechselweise verwendeter Hilfsparameter für kompliziertere physikalische Grössen, die nur in dem betreffenden Unterkapitel vorkommen   |
| <i>R</i>   | Allgemeine Gaskonstante ( $R = 8,314 \ 510 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )  |
| <i>R</i>   | Elektrischer Widerstand  |
| <i>R</i>   | Dichroitisches Verhältnis  |
| <i>R</i>   | Reaktionsgeschwindigkeit, z.B. $R_p$ = Polymerisationsgeschwindigkeit  |
| <i>R</i>   | 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  |
| <i>r</i>   | 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.<br>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 Repetiereinheiten pro Molekül (nicht: Zahl der Monomereinheiten)  |
| $y$             | Ausbeute an Substanz (E: yield)  |

- Z flächenbezogene Energie = längenbezogene Kraft, z.B. Einreissfestigkeit, Schlagzähigkeit oder Kerbschlagzähigkeit (USA: siehe F)
- 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
- $\epsilon$  Lineare Dehnung [ $\epsilon = (L - L_0)/L_0$ ];  $\epsilon_B$  = Reissdehnung
- $\epsilon$  Energie pro Molekül
- $\epsilon$  Erwartung
- $\epsilon_r$  Relative Permittivität (früher: Dielektrizitätskonstante)
- $\zeta$  Verhältnis  $R_h/s$  von hydrodynamischen Radien  $R_h$  zu Trägheitsradien  $s \equiv \langle s^2 \rangle^{1/2}$ , 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), $\lim_{c \rightarrow 0} \eta_{red} \equiv \eta_{red}$ ; 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 $C$ ("Zahlendichte").  |
| $\rho$       | Elektrischer Volumenwiderstand  |
| $\sigma$     | Mechanische Spannung; $\sigma_{11}$ = Normalspannung, $\sigma_{21}$ = Scherspannung, $\sigma_B$ = Zugfestigkeit   |
| $\sigma$     | Standardabweichung  |

|           |   |
|-----------|---|
| $\sigma$  | Behinderungsparameter (sterischer Faktor)   |
| $\sigma$  | Kooperativität  |
| $\sigma$  | Elektrische Leitfähigkeit   |
| $\zeta$   | Kopplungsgrad von Ketten bei Schulz-Zimm-Verteilungen;<br>$\zeta = \bar{M}_n / (\bar{M}_w - \bar{M}_n)$ |
| $\tau$    | 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  |
| $\phi(r)$ | Potential zwischen zwei durch einen Abstand $r$ getrennten Segmenten                                    |
| $\chi$    | Wechselwirkungsparameter bei der Theorie der Lösungen<br>(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  |
| $\omega$  | Winkelgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit  |

## Inhaltsverzeichnis

Weiterführende Literatur und Quellennachweise befinden sich jeweils am Kapitelende.

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

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

### Grundlagen

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

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

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

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

**Grundanwendungen**

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

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

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

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