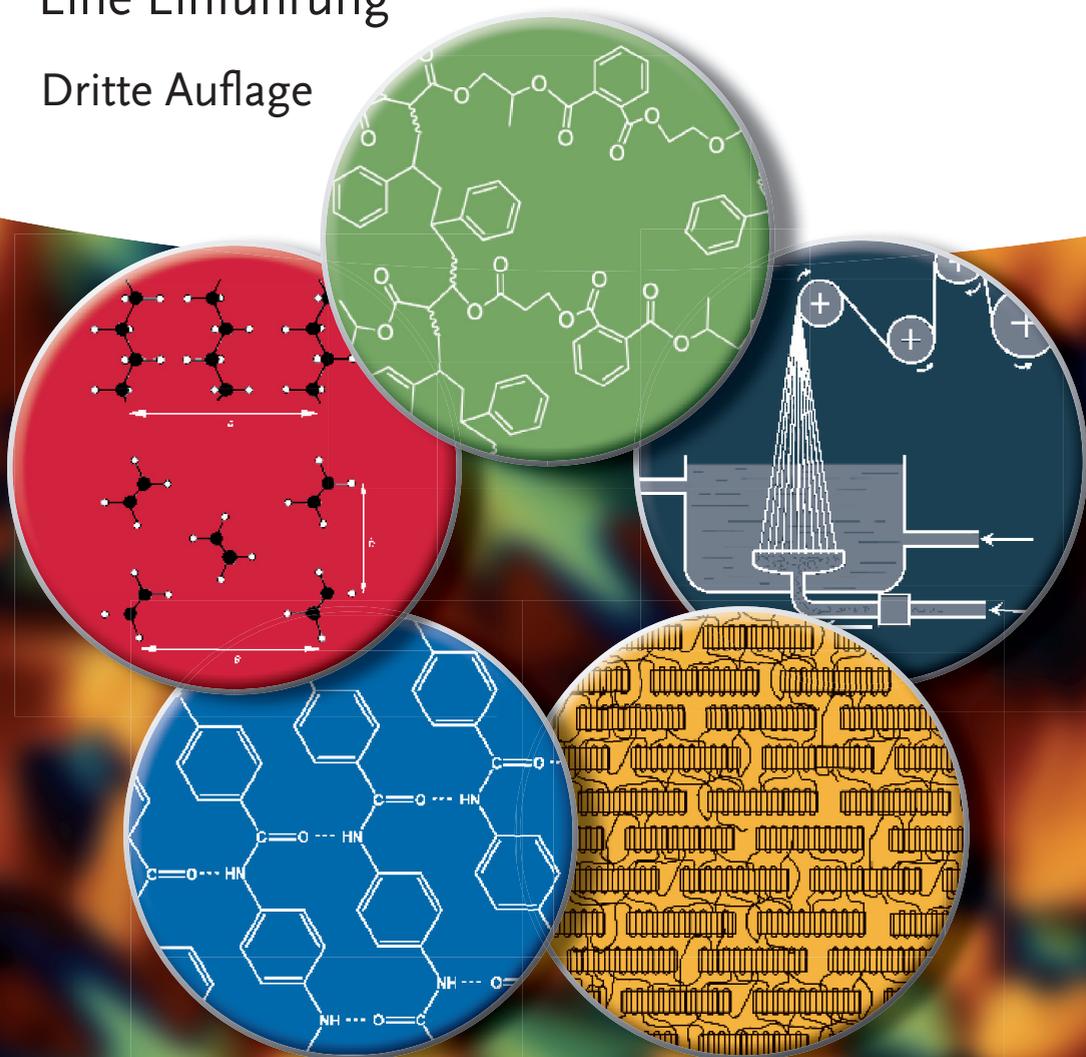


Bernd Tieke

Makromolekulare Chemie

Eine Einführung

Dritte Auflage



Bernd Tiede

Makromolekulare Chemie

Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel zu diesem Thema

Theato, P., Klok, H. (Hrsg.)

**Functional Polymers by
Post-Polymerization
Modification**
Concepts, Guidelines, and Applications

2013

Print ISBN: 978-3-527-33115-4

Mathers, R.T., Meier, M.A. (Hrsg.)

Green Polymerization Methods
Renewable Starting Materials, Catalysis
and Waste Reduction

2011

Print ISBN: 978-3-527-32625-9

Wendorff, J.H., Agarwal, S., Greiner, A.

Electrospinning
Materials, Processing, and Applications

2012

Print ISBN: 978-3-527-32080-6

Gnanou, Y., Fontanille, M.

**Organic and Physical
Chemistry of Polymers**

2008

Print ISBN: 978-0-471-72543-5

Harada, A. (Hrsg.)

**Supramolecular Polymer
Chemistry**

2012

Print ISBN: 978-3-527-32321-0

Keim, W. (Hrsg.)

Kunststoffe
Synthese, Herstellungsverfahren,
Apparaturen

2006

Print ISBN: 978-3-527-31582-6

Schlüter, D.A., Hawker, C., Sakamoto, J.
(Hrsg.)

Synthesis of Polymers
New Structures and Methods

2012

Print ISBN: 978-3-527-32757-7

Elias, H.

Macromolecules
Volume 1: Chemical Structures and
Syntheses

2005

Print ISBN: 978-3-527-31172-9

Bernd Tieke

Makromolekulare Chemie

Eine Einführung

Dritte Auflage

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor**Bernd Tieke**

Universität Köln
Institut für Physikalische Chemie
Luxemburger Str. 116
50939 Köln
Germany

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

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.

Umschlaggestaltung Schulz Grafik-Design, Fußgönheim

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig, Deutschland

Druck and Bindung Markono Print Media Pte Ltd, Singapore

Print ISBN 978-3-527-33216-8

ePDF ISBN 978-3-527-68352-9

ePub ISBN 978-3-527-68351-2

Mobi ISBN 978-3-527-68353-6

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur ersten Auflage IX

Vorwort zur zweiten Auflage XI

Vorwort zur dritten Auflage XIII

Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen XV

1	Grundlegende Bemerkungen und Definitionen	1
1.1	Historisches	1
1.2	Begriffsdefinitionen	3
1.3	Klassifizierungen	5
1.4	Nomenklatur	6
1.5	Molekulargewicht und Polymerisationsgrad	8
1.6	Thermisches Verhalten: T_g und T_m	11
1.7	Mechanisches Verhalten	11
1.8	Verarbeitung	13
1.9	Das Wichtigste im Überblick	13
2	Synthetische Makromolekulare Chemie	15
2.1	Stufenwachstumsreaktion (Polykondensation und Polyaddition)	15
2.1.1	Lineare Stufenwachstumsreaktion	15
2.1.2	Carothers-Gleichung	17
2.1.3	Kinetik	19
2.1.4	Molekulargewichtsverteilung	21
2.1.5	Molekulargewichtsmittelwerte und Polydispersität	23
2.1.6	Technisch genutzte Polymere	24
2.1.7	Nichtlineare Stufenwachstumsreaktion	35
2.1.8	Technisch genutzte Netzwerkpolymere	39
2.1.9	Das Wichtigste im Überblick	59
2.2	Kettenwachstumsreaktion	60
2.2.1	Radikalische Polymerisation	62

2.2.2	Anionische Polymerisation	98
2.2.3	Kationische Polymerisation	117
2.2.4	Stereochemie der Polymere	129
2.2.5	Koordinative Polymerisation an Übergangsmetallen	139
2.2.6	Das Wichtigste im Überblick	153
2.3	Polymerkombinationen	156
2.3.1	Copolymere	156
2.3.2	Polymermischungen	174
2.3.3	Das Wichtigste im Überblick	181
2.4	Sonstige Polymerisationsmethoden	182
2.4.1	Polymere durch palladiumkatalysierte Kreuzkupplung	183
2.4.2	Oxidative Kupplung	185
2.4.3	Enzymatische Polymerisation	188
2.4.4	Azyklische Dienmetathese-Polymerisation	193
2.4.5	Polyrekombination	195
2.4.6	Polymere durch chemische Gasphasenabscheidung	197
2.4.7	Festkörperpolymerisation	199
2.4.8	Das Wichtigste im Überblick	203
2.5	Chemische Reaktionen an Polymeren	204
2.5.1	Polymeranaloge Reaktionen	205
2.5.2	Technisch durchgeführte Polymermodifizierungen	207
2.5.3	Vernetzungsreaktionen von Polymeren	212
2.5.4	Abbaureaktionen von Polymeren	215
2.5.5	Alterung von Polymeren	217
2.5.6	Stabilisierung von Polymeren	219
2.5.7	Das Wichtigste im Überblick	222
2.6	Polymere mit besonderen Eigenschaften	222
2.6.1	Elektrisch leitfähige Polymere	222
2.6.2	Polymere für die Optoelektronik	225
2.6.3	Ferroelektrische Polymere	229
2.6.4	Polyelektrolyte	232
2.6.5	Flüssigkristalline Polymere	236
2.6.6	Biologisch abbaubare Polymere	241
2.6.7	Das Wichtigste im Überblick	243
2.7	Kunststoffverarbeitung	244
2.7.1	Verarbeitung von Thermoplasten	245
2.7.2	Verspinnen von Polymeren	246
2.7.3	Verarbeitung von Duroplasten und Polyurethanen	249
2.7.4	Verarbeiten von Faserverbundwerkstoffen	251
2.7.5	Das Wichtigste im Überblick	252
2.8	Verwertung von Kunststoffabfällen	253
2.8.1	Das Wichtigste im Überblick	255
3	Charakterisierung von Polymeren	257
3.1	Polymere in Lösung	257

3.1.1	Konformation von Kohlenwasserstoffen	257
3.1.2	Die frei drehbare Kette	258
3.1.3	Die reale Kette	260
3.1.4	Thermodynamik von Polymerlösungen	260
3.1.5	Das Wichtigste im Überblick	268
3.2	Bestimmung von \overline{M}_n	268
3.2.1	Membranosmometrie	268
3.2.2	Dampfdruckosmometrie	271
3.2.3	Endgruppenanalyse	273
3.3	Bestimmung von \overline{M}_w	274
3.3.1	Lichtstreuung an Polymerlösungen	274
3.3.2	Lichtstreuung großer Moleküle	276
3.3.3	Röntgen- und Neutronen-Kleinwinkelstreuung	279
3.4	Bestimmung von \overline{M}_η	281
3.4.1	Viskosität von Polymerlösungen	281
3.4.2	Mark-Houwink-Beziehung	283
3.4.3	Flory-Fox-Theorie	283
3.5	Bestimmung der Molekulargewichtsverteilung	284
3.5.1	Gelpermeationschromatografie	284
3.5.2	MALDI-TOF-Massenspektrometrie	286
3.5.3	Andere Methoden	287
3.6	Bestimmung der chemischen Struktur und der sterischen Konfiguration	288
3.6.1	NMR-Spektroskopie	288
3.6.2	Taktizitätsanalyse mittels NMR-Spektroskopie	289
3.6.3	Infrarotspektroskopie	290
3.6.4	Das Wichtigste im Überblick	293
4	Polymere im festen Zustand	295
4.1	Struktur	295
4.1.1	Kristallinität von Polymeren	295
4.1.2	Bestimmung der Kristallstruktur	296
4.1.3	Kristallstrukturen von Polymeren	298
4.1.4	Polymerkristalle aus verdünnter Lösung	300
4.1.5	Schmelzkristallisierte Polymere	301
4.1.6	Kristallisationsgrad	302
4.1.7	Einflüsse auf die Kristallisation	305
4.1.8	Defekte in kristallinen Polymeren	306
4.1.9	Kinetik der Kristallisation	307
4.1.10	Molekulare Mechanismen der Kristallisation	311
4.1.11	Das Wichtigste im Überblick	314
4.2	Thermisches Verhalten	315
4.2.1	Schmelzbereich und Gleichgewichtsschmelzpunkt	315
4.2.2	Schmelztemperatur und Kristalldicke	316
4.2.3	Experimentelle Charakterisierung des thermischen Verhaltens	316

4.2.4	Faktoren, die den Schmelzpunkt beeinflussen	318
4.2.5	Die Glastemperatur	321
4.2.6	Faktoren, die die Glastemperatur beeinflussen	323
4.2.7	Das Wichtigste im Überblick	327
4.3	Mechanische Eigenschaften	327
4.3.1	Phänomene	327
4.3.2	Energieelastizität	328
4.3.3	Entropie- oder Gummielastizität	330
4.3.4	Viskoelastizität	338
4.3.5	Elastizitätsmessungen	345
4.3.6	Dynamische Messung	350
4.3.7	Das Wichtigste im Überblick	356

Beispiele für thermoplastische, elastomere und faserbildende Kunststoffe 359

Referenzen und weiterführenden Literatur 363

Stichwortverzeichnis 373

Vorwort zur ersten Auflage

Die Geschichte dieses Buches beginnt im Sommer 1992, als ich nach der Berufung an das Institut für Physikalische Chemie der Universität Köln vor der Aufgabe stand, eine Einführungsvorlesung über Makromolekulare Chemie vorzubereiten. Die Vorlesung sollte im Wintersemester 1992/93 beginnen und der Vorlesungsstoff innerhalb von zwei Semestern in Portionen von zwei Vorlesungsstunden pro Woche vermittelt werden. Rasch zeigte sich, dass kein geeignetes Lehrbuch im Handel erhältlich war, das den Stoff für eine solche Vorlesung in knapper, verständlicher Form, in deutscher Sprache und zu einem vertretbaren Preis beinhaltet. Also blieb mir nichts anderes übrig, als den Stoff für die Vorlesung aus einer Vielzahl von Büchern – zumeist in englischer Sprache – mühsam zusammenzusuchen. Als gute Vorlagen für die Vorbereitung erwiesen sich insbesondere das klar gegliederte Buch „Introduction to Polymers“ von R.J. Young, das bis auf den sehr knappen organisch-chemischen Teil eine gute Einführung in die Polymerwissenschaft liefert, einige Teile des Buches „Polymers: Chemistry & Physics of Modern Materials“ von J.M.G. Cowie (und dessen deutsche Übersetzung), die sehr ausführlichen „Makromoleküle“ von H.-G. Elias, H. Batzers „Polymere Werkstoffe“ und die von F. Rodriguez stammenden „Principles of Polymer Systems“, von denen einige auch technische Aspekte der Makromolekularen Chemie ausführlicher behandeln. Der Mangel an geeigneten Lehrbüchern wirkte sich auch auf die Prüfungsvorbereitungen der Studenten aus. Oft wurde ich gefragt, welches Lehrbuch denn am besten geeignet sei. Um die Antwort nicht länger schuldig bleiben zu müssen, entstand im Laufe des Jahres 1993 allmählich ein Skript zur Vorlesung.

Für die zweite Vorlesung im Wintersemester 1994/95 und im nachfolgenden Sommersemester wurde dieses Skript überarbeitet, erweitert und aktualisiert. Die zweite Fassung ist bis auf eine textliche Überarbeitung mit dem vorliegenden Buch identisch. Das Buch soll in das Gebiet der Makromolekularen Chemie einführen und beschränkt sich daher fast ausschließlich auf die Vermittlung von Grundlagenwissen. Es wendet sich primär an Universitätsstudenten der Chemie im Hauptstudium (zwischen Vordiplom und Diplom) und eignet sich z. B. zur Vorbereitung auf die Diplomprüfung in einem Wahl(pflicht)fach/Spezialfach Makromolekulare Chemie, kann aber auch für Studenten an der Fachhochschule von Interesse sein. Es richtet sich zudem an Doktoranten, die Makromolekulare Chemie als Nebenfach für eine Doktorprüfung wählen wollen, oder allgemein an Chemiker, die

grundlegende Kenntnisse in Makromolekularer Chemie erwerben wollen. Es wird versucht, den Stoff in knapper, aber verständlicher Form und klar gegliedert zu vermitteln, wobei die Teilgebiete organische Polymerchemie, physikalische Polymerchemie und Physik der Polymeren gleichermaßen berücksichtigt werden.

Allerdings ist das Gebiet der Makromolekularen Chemie inzwischen so umfangreich, dass nicht alle Teile in einer einführenden Vorlesung gebührend berücksichtigt werden können. Also muss der Stoff reduziert werden. In diesem Buch fehlen z. B. Kapitel über Biopolymere, technische Verarbeitung und Recycling von Polymeren. Ebenso wurden z. B. flüssigkristalline Polymere, leitfähige Polymere und Dendrimere weggelassen, obwohl sie in letzter Zeit in der Forschung großes Interesse gefunden haben. Die heute technisch wichtigen Polymere werden dagegen ausführlich behandelt. Sicher kann die Stoffauswahl Anlass zur Kritik bieten, weil sie recht subjektiv ist. Kritik ist im Übrigen aber willkommen: Für Hinweise auf Fehler bin ich ebenso dankbar wie für Verbesserungsvorschläge.

Das vorliegende Buch ist nur durch intensive Hilfe möglich gewesen. Viel Unterstützung bekam ich von Frau Hannelore Jarke, die das handgeschriebene Skript in eine computergeschriebene Version übertrug, und insbesondere von Frau Burgunde Feist, die alle chemischen Formeln und Zeichnungen mit dem Computer erstellt und den Text nochmals technisch überarbeitet hat. Beiden sei hiermit ganz herzlich gedankt. Mein Dank gebührt auch allen Studentinnen und Studenten, die mich auf Fehler im Skript aufmerksam gemacht und so geholfen haben, die Zahl der Irrtümer zu reduzieren. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. G. Trafara und Frau Dr. M. Holota, Institut für Physikalische Chemie der Universität zu Köln sowie Herrn Dr. G. Lieser, Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz, für die freundliche Überlassung von Material für dieses Buch.

Köln, im April 1997

Bernd Tieke

Vorwort zur zweiten Auflage

Als abzusehen war, dass die erste Auflage des Buches „Makromolekulare Chemie – Eine Einführung“ bald verkauft sein würde, hat mich der Verlag Wiley-VCH ermuntert, eine überarbeitete und erweiterte Version des Buches zu erstellen. Nach einigen Anläufen fand ich zu Beginn des Jahres 2005 endlich die hierfür nötige Zeit. Schreibfehler und sonstige Fehler wurden korrigiert, einzelne Kapitel umgeschrieben, erweitert und neue Kapitel ergänzt. Letzteres betrifft insbesondere die Kapitel über lebende kationische und radikalische Polymerisation, elektrisch leitfähige Polymere, flüssigkristalline Polymere, Polyelektrolyte, bioabbaubare Polymere, Polymerverarbeitung und Recycling von Polymeren. Trotz aller Ergänzungen wurde versucht, den bisherigen Charakter des Buches eines erweiterten Vorlesungsskripts, das sich insbesondere an Studenten im Grund- und Hauptstudium Chemie richtet, beizubehalten. Das Buch soll eine handliche Einführung in die Makromolekulare Chemie bieten, in der wichtige Aspekte des Fachgebiets behandelt werden. Ein Nachschlagewerk der Makromolekularen Chemie ist es sicher nicht und soll es auch nicht sein. Man mag daher verzeihen, dass wichtige Kapitel über Polymerblends, Kompositmaterialien, Dendrimere und Biopolymere auch weiterhin fehlen.

Mein herzlicher Dank gilt zuallererst Frau Burgunde Feist, die aus der Rohfassung des Manuskripts die vorliegende Computerversion angefertigt hat. Vielen Dank auch an zahlreiche Leser, die mich auf Fehler hingewiesen und Verbesserungsvorschläge gemacht haben.

Köln, im Juli 2005

Bernd Tieke

Vorwort zur dritten Auflage

Die dritte Auflage stellt eine erweiterte Fassung der bisherigen Einführung in die Makromolekulare Chemie dar. Insbesondere die ersten beiden Kapitel haben eine gründliche Überarbeitung erfahren. Einige Abschnitte wurden neu aufgenommen, wie z. B. über Polymerblends, Polymere durch palladiumkatalysierte Kreuzkupplung, enzymatische Polymerisation, Polymere für die Optoelektronik, ferroelektrische Polymere und MALDI-TOF-Massenspektrometrie. Viele andere Kapitel wurden überarbeitet, ergänzt und aktualisiert. Der präsentierte Stoff ist nun so umfangreich, dass er in einer einsemestrigen Vorlesung mit drei bis vier Wochenstunden kaum noch zu bewältigen ist und eine Auswahl getroffen werden muss. Auch in der neuen Auflage ist das Buch im Stil eines erweiterten Vorlesungsskripts gehalten und soll ein Lehrbuch und kein Nachschlagewerk sein. Das Buch richtet sich hauptsächlich an Studierende der Chemie im Bachelor- und Masterstudium und stellt eine Einführung in das Fachgebiet der Makromolekularen Chemie dar.

Einige Leser haben mich auf Fehler in der zweiten Auflage hingewiesen und mir Verbesserungsvorschläge zugesendet, die ich zum großen Teil berücksichtigt habe. Die Fehler wurden korrigiert. Allen sei hiermit gedankt. Besonders danken möchte ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Kalie Cheng, Monika Domogalla, Nicolas Vogt und Daniel Vohs sowie meiner Frau Dr. Karin Tieke, die mir bei der elektronischen Herstellung und Überarbeitung der Zeichnungen, chemischen und sonstigen Formeln behilflich waren und aus der handgeschriebenen eine elektronische Version des Manuskripts erstellt haben.

Köln, im April 2014

Bernd Tieke

Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen

A	Arrheniuskonstante der Initiierungsreaktion (A_i), Wachstumsreaktion (A_p), Abbruchreaktion (A_t), Übertragungsreaktion (A_{tr}); Abbaugrad des Ausgangspolymers (A_0) und des Polymers nach der Reaktionszeit t (A_t); Fläche, ursprüngliche Fläche (A_0), Fläche der Streuung der amorphen (A_a) bzw. kristallinen Bereiche (A_c)
A, B	Konstanten der Doolittle-Gleichung
$A_{2,3}$	2. bzw. 3. Virialkoeffizient
Ar	Aryl-Rest
a	Exponent der Mark-Houwink-Gleichung, Verschiebungsfaktor (a_T)
B	magnetische Feldstärke, lokale magnetische Feldstärke (B_{lok})
b	Streulänge bei Neutronenstreuung, Streulängen von Wasserstoff (b_H) und Deuterium (b_D)
C	Kohäsionsenergiedichte; Wärmekapazität, bei konstanter Länge (C_l) und bei konstantem Feld und Zug ($C_{E,X}$)
c	Massenkonzentration der Lösung (zu Beginn der Reaktion: c_0)
c_1^g	universelle Konstanten der WLF-Gleichung ($c_1^g = 17,4 \text{ K}$, $c_2^g = 51,6 \text{ K}$)
c_p	Wärmekapazität, spezifische Wärme bei konstantem Druck
D	dielektrische Verschiebung (auch Q/A)
DMSO	Dimethylsulfoxid
DS	Substitutionsgrad bei Polysacchariden
DSC	Differenzialkalorimetrie (differential scanning calorimetry)
DTA	Differenzialthermoanalyse
d	Gitterkonstante, piezoelektrische Konstante (z. B. d_{31})
dn/dc	Brechungsinkrement der Polymerlösung
E	Aktivierungsenergie der Initiierungsreaktion (E_i), Wachstumsreaktion (E_p), Abbruchreaktion (E_t), Übertragungsreaktion (E_{tr}); Elastizitätsmodul bzw. E -Modul, theoretischer (E_{th}), scheinbarer (E_{krist}) und realer E -Modul (E_o); komplexer E -Modul (E^*), Speichermodul (E_1) und Verlustmodul (E_2); elektrische Feldstärke, elektrischer Feldvektor (\vec{E})
$E_r(t)$	Spannungsrelaxationsmodul

F	freie Energie
f	Funktionalität der Verzweigungseinheit (f) und des j -ten Monomers (f_j), durchschnittliche Funktionalität aller Monomere (f_{av}); Kraft; Depolarisations (Cabannes)-Faktor; freier Volumenbruch $V_f/V(f_g : V_f^*/V)$
G	freie Enthalpie; freie Enthalpie von Lösungsmittel (G_1), Polymer (G_2) und Lösung (G_{12}); Schermodul (G -Modul); (Realteil: G_1 ; Imaginärteil: G_2)
GPC	Gelpermeationschromatografie
ΔG	Änderung der freien Enthalpie beim Mischen (ΔG_M ; ΔG_{mix}), bei der Kristallisation bzw. Schmelze pro Einheitsvolumen (ΔG_v), bei der Kristallisation von n Kettenstücken (ΔG_n)
$\Delta \bar{G}_1$	partielle molare freie Enthalpie (freie Exzess-Enthalpie: $\Delta \bar{G}_1^E$) der Mischung
g	Erdbeschleunigung
g^+, g^-	<i>gauche</i> (+)- und <i>gauche</i> (-)-Konformation
H	Enthalpie
ΔH	Änderung der Enthalpie beim Mischen (ΔH_M ; ΔH_{mix}), bei der Kristallisation bzw. Schmelze pro Einheitsvolumen (ΔH_v)
$\Delta \bar{H}$	Änderung der molaren Enthalpie beim Mischen ($\Delta \bar{H}_M$); beim Verdampfen ($\Delta \bar{H}_v$)
$\Delta \bar{H}_1^E$	partielle molare Exzess-Enthalpie der Mischung
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (high density polyethylene)
h	Abstand Primärstrahl-Streustrahl (bei der Röntgenstreuung); Planck'sches Wirkungsquantum ($6,26 \cdot 10^{-34}$ J s)
Δh	Höhendifferenz im Steigrohr zur Messung des osmotischen Druckes
I	Trägheitsmoment, Kernspindrehimpulsquantenzahl, Stromstärke
$I(t)$	Kriechnachgiebigkeit
IR	Infrarot
i	Zahl der Monomereinheiten in der Polymerkette; Laufzahl der Monomere
i_θ	Streuintensität
K	Konstante bei der Lichtstreuung; Konstante der Mark-Houwink-Gleichung (K_θ : bei θ -Bedingungen); Kompressionsmodul
K_D	Gleichgewichtskonstante der Ionendissoziation
K_E	Konstante bei der Molgewichtsbestimmung durch Dampfdruckosmometrie
K_n	Kontrastfaktor bei Neutronenstreuung
K_X	Kontrastfaktor bei Röntgenkleinwinkelstreuung
k, k'	Geschwindigkeitskonstanten einer chemischen Reaktion: Initiierungsreaktion (k_i), Startreaktion (k_s), Wachstumsreaktion (k_p), Wachstumsreaktion des Ionenpaares ($k_{p(+)}$) und des freien Anions ($k_{p(-)}$), Abbruchreaktion (k_t), Abbruchreaktion durch Rekombination (k_{tc}) und Disproportionierung (k_{td}), Depolymerisation (k_{dp}), Übertra-

	gungsreaktion (k_{tr}), Übertragungsreaktion durch Monomer (k_{trM}), Initiator (k_{tri}) und Lösungsmittel (k_{trS}), Hydrolyse (k_H), Kettenspaltung (k_S)
L	Ligand
L	Dehnung
L_1	Verdampfungswärme des Lösungsmittels pro Gramm
LCST	untere kritische Entmischungstemperatur
LDPE	Polyethylen niedriger Dichte (low density polyethylene)
l	Bindungslänge; Länge der Kapillaren im Viskosimeter; Lamellendicke, kritische Lamellendicke (l_0); Länge vor bzw. nach mechanischer Beanspruchung eines Probenkörpers (l_0 bzw. l); Kettenlänge; maximale Kettenlänge (l_{max}), Konturlänge (l_{cont})
Δl	Längenänderung bei der mechanischen Beanspruchung
M	Monomer, Kette aus i Monomereinheiten (M_i); Metall
M	Molekulargewicht; Molekulargewicht des Monomeren (M_0) und des Moleküls der Länge i (M_i)
\overline{M}	mittleres Molekulargewicht des Polymers: Zahlenmittel (\overline{M}_n), Gewichtsmittel (\overline{M}_w), Zentrifugemittel (\overline{M}_z), Viskositätsmittel (\overline{M}_η), Zahlenmittel des Molekulargewichts der Kettenstücke zwischen zwei Netzpunkten (\overline{M}_c)
Mt	Metallatom
m	Masse des Polymers; Masse der Polymerschmelze zur Zeit t_0 (m_0) bzw. zur Zeit t (m_L), Masse des einzelnen Sphärolithen m'_s bzw. des sphärolithischen Materials (m_s); Masse des amorphen bzw. kristallinen Polymers ($m_{a,c}$), Gesamtmasse der Polymerschmelze (m_0)
N	Zahl der Moleküle; ursprüngliche Zahl der Monomermoleküle (N_0), Zahl der Moleküle des j -ten Monomers (N_j), Zahl der Monomermoleküle zur Zeit t (N_t), Zahl der Lösungsmittelmoleküle (N_1), Zahl der Polymermoleküle (N_2), Zahl der Moleküle der Länge i (N_i); Zahl der Ketten pro Einheitsvolumen, Zahl der Nuklei pro Einheitsvolumen und -zeit, Zahl der Nuklei insgesamt (N_{ges})
N_A	Avogadro-Konstante
NMP	<i>N</i> -Methylpyrrolidon
NMR	kernmagnetische Resonanz (nuclear magnetic resonance)
n	Molzahl; Zahl der Monomereinheiten in der Polymerkette; Ordnungszahl des Reflexes (bei der Röntgenstreuung)
n_0	Brechungsindex des Lösemittels
$n_{g,t}$	Zahl der <i>gauche</i> - bzw. <i>trans</i> -Konformationen pro Kette
P	Polarisation
$P(\theta)$	winkelabhängige Streufunktion
$P_{(i)}$	Wahrscheinlichkeit für die Bildung des Polymermoleküls aus i Monomereinheiten
P	Polymerkette, Polymerkette aus n Monomereinheiten (P_n)
PA 66	Polyamid 66
PE	Polyethylen

PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
p	Dampfdruck der Lösung (p_1) bzw. des reinen Lösemittels (p_1^0); Umsatz bzw. Umsatz, bei dem Gelierung eintritt (p_G); Zahl der Kontakte in der Polymerlösung; Polarisationsfaktor; pyroelektrische Konstante (z. B. p_3)
Δp	relative Dampfdruckerniedrigung
Q	Ladung
R_θ	reduzierte Streuintensität
R, R_n	Alkyl- oder Alkylen-Rest, auch Aryl- oder Arylen-Rest
r	stöchiometrisches Verhältnis der Ausgangskomponenten bei der Stufenwachstumsreaktion; Abstand Probe-Detektor bzw. Probe-Film bei der Röntgenstreuung; Kapillardurchmesser beim Viskosimeter; Sphärolithradius; Elektronenradius (r_e)
$r_{1,2}$	Reaktivitätsverhältnisse bei der Copolymerisation
$\langle r^2 \rangle$	mittleres Quadrat des Kettenabstands beim ungestörten Knäuel $\langle r^2 \rangle_0$ und bei Annahme fester Bindungswinkel $\langle r^2 \rangle_{fw}$
$\langle r^2 \rangle^{1/2}$	mittlerer Kettenendenabstand, im realen Knäuel $\langle r^2 \rangle_{real}^{1/2}$
S	Entropie; Scherspannung
S_N	nukleophile Substitution
ΔS_i	Änderung der Entropie beim Mischen (ΔS_M ; ΔS_{mix}), bei der Kristallisation bzw. Schmelze pro Einheitsvolumen (ΔS_v), der Einzelkette (ΔS_i), der partiellen molaren Exzess-Entropie der Mischung ($\Delta \bar{S}_1^E$)
$\langle s^2 \rangle^{1/2}$	mittlerer Trägheitsradius
T	Temperatur; Glastemperatur (T_g), Glastemperatur bei unendlichem Molekulargewicht (T_g^∞), Gleichgewichtsschmelztemperatur bzw. ideale Schmelztemperatur (T_m^0), Ceiling-Temperatur (T_C), Kristallisationstemperatur (T_c), Lösungstemperatur (T_s)
TMS	Tetramethylsilan
THF	Tetrahydrofuran
ΔT	Unterkühlung (bei der Kristallisation); Temperaturdifferenz bei der Dampfdruckosmometrie (theoretisch: ΔT_{th} ; experimentell: ΔT_{exp})
t	Zeit; <i>trans</i> -Konformation
U	Uneinheitlichkeit, innere Energie, Spannung
UCST	obere kritische Entmischungstemperatur
ΔU_v	molare innere Verdampfungsenergie
V	Volumen der Lösung; Volumen des Polymers; tatsächliches Volumen (V_p), freies Volumen (V_f), eingefrorenes freies Volumen (V_f^*), Volu-

	men des amorphen (V_a) und kristallinen Polymers (V_c), Volumen bei der Kristallisation; Ausgangsvolumen (V_0), Endvolumen (V_∞) und Volumen zur Zeit t (V_t); Elutionsvolumen (V_e); Volumen der Wiederholungseinheit (V_u)
\bar{V}	Molvolumen; Molvolumen der Gasphase (\bar{V}_g) und der flüssigen Phase (\bar{V}_l)
W	Arbeit; Wahrscheinlichkeit
w	isotherm reversible Deformationsarbeit pro Einheitsvolumen; Gewichtsbruch der Moleküle mit der Länge i (w_i), Gewichtsbruch der kristallinen Phase (= Kristallisationsgrad; w_c)
X	Zug
\bar{X}	mittlerer Polymerisationsgrad; Zahlenmittel des Polymerisationsgrades (\bar{X}_n), Zahlenmittel des Polymerisationsgrades bei Kettenabbau zur Zeit t_0 ($\bar{X}_{n,0}$) und zur Zeit t ($\bar{X}_{n,t}$), Gewichtsmittel des Polymerisationsgrades (\bar{X}_w)
x	Molenbruch der Moleküle mit der Länge i (x_i), der Lösemittelmoleküle (x_1), der Polymermoleküle (x_2) und des Weichmachers (x_w)
z	Koordinationszahl des Gitters
ΔZ	Differenz der Elektronendichte der Wiederholungseinheit und des Lösemittels bei der Röntgenkleinwinkelstreuung
α	Expansionsfaktor zur Berechnung der realen Knäuelgröße; Wahrscheinlichkeit (Abschn. 2.2.1.8); Verzweigungskoeffizient, kritischer Verzweigungskoeffizient (α_c); thermischer Ausdehnungskoeffizient des freien Volumens (α_f)
γ	Scherung; Verhältnis der Zahl der Endgruppen A an Verzweigungsstellen zur Gesamtzahl der vorhandenen Endgruppen A (siehe Abschn. 2.1.7.2); Oberflächenenergie; Faltoberflächenenergie (γ_e); laterale Oberflächenenergie (γ_s); gyromagnetisches Verhältnis des Kerns (γ_N)
Δ	Änderung einer Größe
δ	Phasenwinkel; Löslichkeitsparameter des Lösemittels (δ_1) und des Gelösten (δ_2); chemische Verschiebung
ε	dielektrische Konstante; Dehnung; Wechselwirkungsenergie in der Polymerlösung (Lösemittel-Lösemittel (ε_{11}); Lösemittel-Polymer (ε_{12}) und Polymer-Polymer (ε_{22}))
$\Delta\varepsilon$	Energiedifferenz (zwischen Lösemittel und Polymerlösung)
η	Viskosität; Viskosität des Lösemittels (η_0); relative Viskosität (η_{rel}); spezifische Viskosität (η_{sp}); Grenzviskositätszahl, Staudinger-Index [η]
θ	Winkel: Bindungswinkel, Streuwinkel, Drehwinkel; θ -Temperatur (Temperatur, bei der sich die Lösung pseudoideal verhält)
κ	Enthalpieparameter
Λ	Dämpfung
λ	Wellenlänge; Dehnverhältnis ($\lambda_{1,2,3}$: in x -, y -, z -Richtung)

$\Delta\lambda$	Wellenlängendifferenz der Streustrahlung (vordere: $\Delta\lambda_v$; hintere: $\Delta\lambda_h$)
μ	Poisson-Zahl
ν	Wachstumsrate von Kristallen; Frequenz (des resonanten Radiofrequenzfeldes: ν_0); kinetische Kettenlänge $\bar{\nu}$; Larmorfrequenz ν_L
Π	osmotischer Druck
ρ	Dichte; Dichte der Lösung (ρ_s); Dichte des amorphen (ρ_a) und kristallinen Polymers (ρ_c); Dichte der Polymerschmelze (ρ_L) und des sphärolithisch kristallisierten Polymers (ρ_S), Elektronendichte der Wiederholungseinheit ($\rho_{e,u}$) und des Lösemittels ($\rho_{e,s}$)
$\Delta\Sigma/\Delta\Omega$	effizienter Streuquerschnitt
σ	sterischer Parameter zur Bestimmung von $\langle r^2 \rangle_0$; Abschirmungskonstante (σ von TMS: σ_{TMS}); Zugspannung (nominale Spannung: σ_n)
$\Delta\sigma$	Spannungsinkrement
τ	Zeitdauer der Einwirkung eines Spannungsinkrements
τ_0	Relaxationszeit
ϕ	Bindungsrotationswinkel; universelle Konstante (Flory-Fox-Theorie); Volumenbruch des Lösemittels in der Polymerlösung (ϕ_1) und des Polymers in der Polymerlösung (ϕ_2), Volumenbruch der kristallinen Phase (ϕ_c)
χ	Polymer-Lösemittel-Wechselwirkungsparameter
ψ	Entropieparameter
Ω	Anzahl der möglichen Kettenkonformationen bzw. Anordnungsmöglichkeiten der Kette
ω	Kreisfrequenz

1

Grundlegende Bemerkungen und Definitionen

1.1

Historisches

Über eine sehr lange Zeit gab sich der Mensch mit den Materialien zufrieden, die ihm die Natur zur Verfügung stellte. Zu den organischen und polymeren Materialien gehörten Holz, Naturfasern, Felle, Horn, Pech, Proteine und Kohlehydrate.

Erst im 19. Jahrhundert begann die makromolekulare Chemie. Zunächst wurden Naturprodukte chemisch modifiziert. Wichtige Daten sind:

- 1839 *Charles Goodyear* Vulkanisation von Kautschuk mit Schwefel
- 1841 *Thomas Hancock* Hartgummi (Ebonit)
- 1845 *Christian F. Schönbein* Schießbaumwolle durch Behandeln von Baumwolle mit Salpetersäure
- 1855 *Alexander Parkes* Parkesine, erster Thermoplast durch Erhitzen von Schießbaumwolle, Alkohol und Kampfer
- 1868 *John W. Hyatt* Celluloid, ähnlich hergestellt wie Parkesine
- 1887 *W. Krische, A. Spitteler* Galalith durch Behandeln von Kasein mit Formaldehyd
- 1889 *H. Graf von Chardonnet* Kunstseide (Rayon)-Spinnverfahren auf Basis von denitrierter Cellulose
- 1897 *M. Fremery, J. Urban* Kupferseide (Cupro) durch Lösen von Cellulose in Kupferoxid/Ammoniak und Verspinnen in warmes Wasser

Das erste vollsynthetische Polymer war Bakelit®. Leo H. Baekeland wurde 1907 das Patent für ein Verfahren zur Herstellung eines Polykondensats aus Phenol und Formaldehyd erteilt. Ab 1910 wurde Bakelit vermarktet. In den Folgejahren kamen zahlreiche weitere synthetische Polymere hinzu. Einige sind in der folgenden Zeittafel aufgelistet, die zeitlichen Angaben zu einigen der Polymere sind in der Literatur nicht einheitlich:

- 1910 Bakelit (Phenol-Formaldehyd-Harz)
- 1915 Erster Synthesekautschuk aus Dimethylbutadien
- 1918/24 Aminoplaste (Harnstoff-Formaldehyd-Harze)
- 1928 Polyvinylchlorid (erstes Patent bereits 1912 durch F. Klatte)
- 1931 Polystyrol (IG Farben, Ludwigshafen)
- 1932 Polymethylmethacrylat (Röhm und Haas)
- 1933 Hochdruckpolyethylen (ICI)
- 1935 Polyamid 6.6 (W.H. Carothers, Dupont)
- 1937 Polyurethan (O. Bayer)
- 1938 Polyamid 6, Polytetrafluorethylen
- 1949 Styropor
- 1950 Polyacrylnitrilfasern
- 1957 Niederdruckpolyethylen, Polypropylen
- 1958 Polyoxymethylen

In der Folgezeit wurden zunehmend Polymere für Spezialanwendungen (Funktionspolymere, maßgeschneiderte Polymere) entwickelt wie z. B. hochtemperaturstabile Polymere, faserverstärkte Polymere, flüssigkristalline Polymere, Polymermembranen, Polyelektrolyte (Superabsorber), Polymere für die Medizintechnik, elektrisch leitfähige Polymere. Ferner wurden die Verarbeitungstechniken verbessert und weiterentwickelt. Die wissenschaftlichen Fortschritte auf dem Gebiet der Makromolekularen Chemie wurden mit mehreren Chemie-Nobelpreisen gewürdigt:

- 1953 *Hermann Staudinger* Entdeckungen auf dem Gebiet der Makromolekularen Chemie
- 1963 *Karl Ziegler, Giulio Natta* Entdeckungen auf dem Gebiet der Chemie und Technologie der Hochpolymere
- 1974 *Paul J. Flory* Grundlegende Leistungen sowohl theoretisch als auch experimentell in der Physikalischen Chemie der Makromoleküle
- 2000 *Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid, Hideki Shirakawa* Entdeckung und Entwicklung leitfähiger Polymere

Weitere Nobelpreise in Physik und Chemie wurden für wissenschaftliche Leistungen vergeben, die die Makromolekulare Chemie tangieren:

- 1991 *Pierre-G. de Gennes* Arbeiten über Ordnungsprozesse in Flüssigkristallen und Polymerlösungen, vor allem die Anwendung mathematischer Modelle beim Übergang vom geordneten in den ungeordneten Zustand
- 2005 *Y. Chaussin, R. Grubbs, R. Schrock* Entwicklung der Metathese-Methode in der organischen Synthese
- 2010 *R.F. Heck, E.-I. Negishi, A. Suzuki* Palladiumkatalysierte Kreuzkupplungen in organischer Synthese

1.2

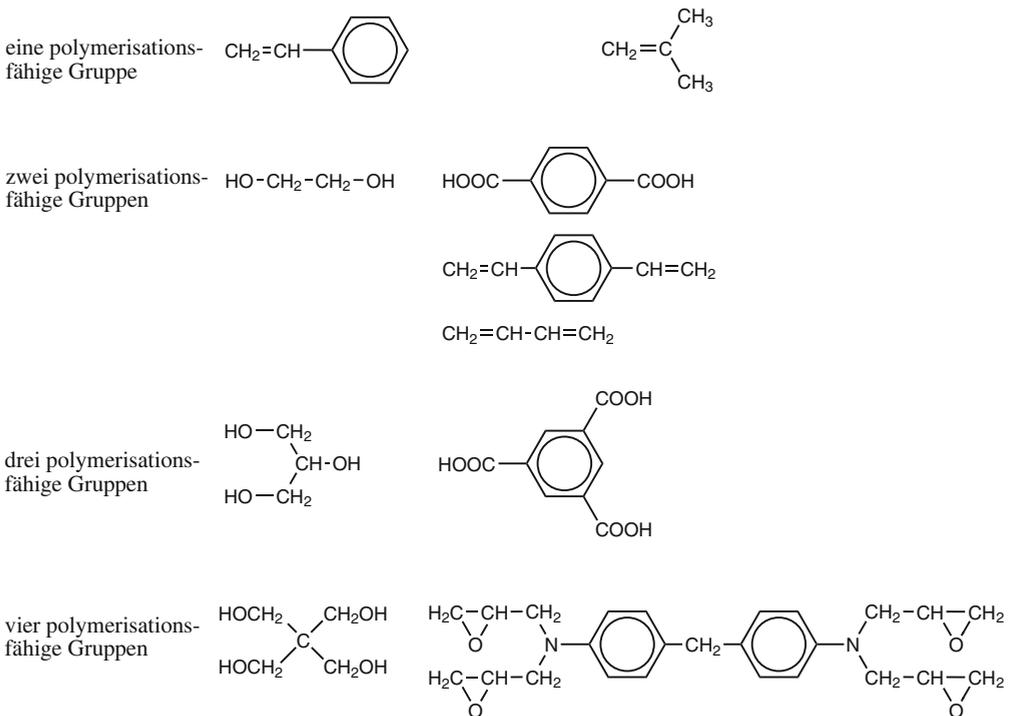
Begriffsdefinitionen

Ein *Makromolekül* ist ein großes Molekül, das kovalent aus vielen Atomen aufgebaut ist. Es existiert keine strenge Begrenzung für die Zahl der Atome. Es kann linear, verzweigt oder dreidimensional vernetzt aufgebaut sein. Beispiele für Makromoleküle sind Proteine, DNA, Zellulose, Stärke, Lignin, aber auch Dendrimere, Phenol-Formaldehyd-Addukte und Polyethylenmoleküle.

Etwas enger gefasst ist der Begriff *Polymer*. Ein Polymer ist das n -Mere des Monomers, wobei die Monomereinheiten über *kovalente* Bindungen verknüpft sind. Polymermoleküle mit nur wenigen Wiederholungseinheiten n haben in aller Regel noch nicht jene typischen Eigenschaften, die Polymermoleküle aus vielen Einheiten n besitzen. Man unterscheidet daher zwischen Monomer ($n = 1$), Oligomer ($n > 1$, ohne scharfe Grenze nach oben) und Polymer ($n \gg 1$). Polymere sind nur aus einer oder wenigen Monomerarten aufgebaut. Beispiele für Polymere sind Polystyrol, Polyamid, Polyethylen, aber auch ein vernetztes Polyurethan oder ein Epoxidharz.

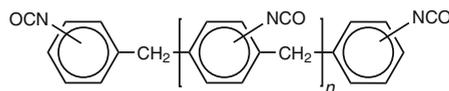
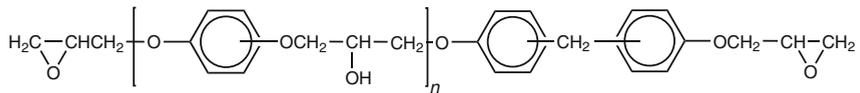
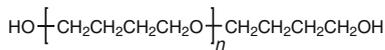
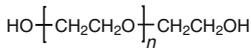
Der Begriff *Kunststoff* wird synonym für Polymer verwendet, bezieht sich aber häufig auf Gebrauchspolymere, die für technische und alltägliche Anwendungen aufbereitet (d. h. mit Additiven versehen) sind.

Ein *Monomer* ist ein Molekül, das eine oder mehrere polymerisationsfähige Gruppen trägt. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgelistet.

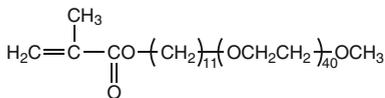


Neben den Monomeren sind auch *Präpolymere*, *Telechele* und *Makromonomere* in der Lage, zu polymerisieren. Präpolymere sind Oligomere oder kurzkettige Polymere, die zwei oder mehrere zur Polymerisation befähigende Gruppen tragen. Befinden sich die Gruppen ausschließlich an den Kettenenden, spricht man von Telechelen. Polymerisationsfähige Gruppen können beispielsweise $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SH}$, $-\text{CH}=\text{CH}_2$, $-\text{Cl}$, $-\text{CCl}_3$, $-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{H}$ oder $-\text{NCO}$ sein.

Einige Beispiele für Telechele und Präpolymere sind nachfolgend aufgelistet. Es sind (von oben nach unten) OH-endfunktionalisiertes Polyethylenglykol und Polytetrahydrofuran, ein Epoxidharz (Bisphenol-F-diglycidylether) mit Oxiran-Endgruppen und ein Polyisocyanat mit mehreren reaktiven Isocyanatgruppen:



Als *Makromonomere* werden Oligomer- und kurzkettige Polymermoleküle bezeichnet, die nur an einem Ende eine polymerisationsfähige Gruppe tragen, wie z. B. α -Methacryloylundecyl- ω -methylpolyethylenglykol:



Als *Funktionalität* eines Monomers wird häufig die Anzahl der chemischen Bindungen bezeichnet, die es bei der Polymerisation mit anderen Monomeren ausbilden kann. Monomere, die mit zwei anderen Monomeren reagieren und lineare Polymerketten bilden, sind *bifunktionell*. Bildet ein Monomer drei Bindungen zu Nachbarmonomeren aus, ist es *trifunktionell* und stellt eine Verzweigungseinheit dar. Der Begriff der Funktionalität ist vom Reaktionstyp abhängig. Bei der Bildung linearer Polyamide wird ein Diamin mit zwei Disäuremolekülen verknüpft und ist daher bifunktionell. Dasselbe Diamin kann aber mit vier Epoxidgruppen unter Bildung von Epoxid-Amin-Polymernetzwerken reagieren und ist dann *tetrafunktionell*.

IUPAC-Empfehlungen zu Begriffen und Bezeichnungen der makromolekularen Chemie finden sich in der Literatur [1].

1.3

Klassifizierungen

Polymere werden auf verschiedene Weise klassifiziert. Gebräuchlich sind Klassifizierungen nach

- dem strukturellen Aufbau,
- der Anzahl und Anordnung verschiedener Monomerbausteine,
- Herkunft, thermischem und mechanischem Verhalten.

Wie in Abb. 1.1 gezeigt, können Polymere eine lineare, verzweigte, vernetzte, sternförmige oder ringförmige Struktur aufweisen.

Hinzu kommen kammförmige Polymere, regelmäßige verzweigte Polymere (Dendrimere) und Leiterpolymere (Abb. 1.2).

Einer anderen Klassifizierung zufolge werden Polymere nach der Anzahl und Anordnung verschiedener Monomerbausteine bezeichnet (Abb. 1.3). Es werden Homopolymere, Co- und Terpolymere unterschieden, deren Ketten aus einer, zwei oder drei verschiedenen Arten von Monomerbausteinen aufgebaut sind. Je nach Anordnung der Bausteine in der Kette wird zwischen statistischen, alternierenden, blockförmigen und gefropften Copolymeren (oder Terpolymeren) unterschieden.

Eine weitere Klassifizierung unterscheidet Polymere nach ihrer Herkunft (Abb. 1.4). Aus der Natur stammende Polymere werden als Biopolymere bezeichnet. Zu ihnen gehören Polysaccharide, Kautschuk, Harze und Proteine. Sie werden zu den synthetischen Polymeren abgegrenzt.

Die synthetischen Polymere wiederum lassen sich nach ihrem thermischen und mechanischen Verhalten unterscheiden. Lineare Polymere, die in der Wärme plas-

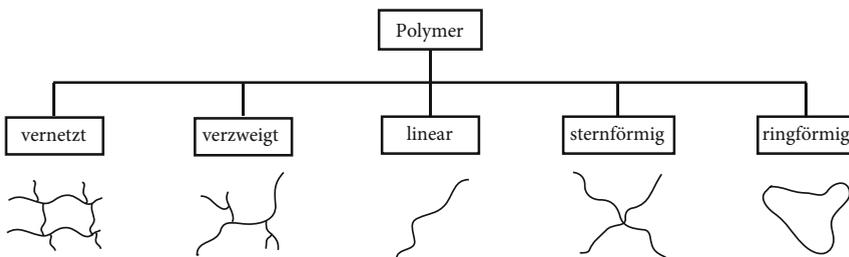


Abb. 1.1 Klassifizierung von Polymeren nach ihrem strukturellen Aufbau.

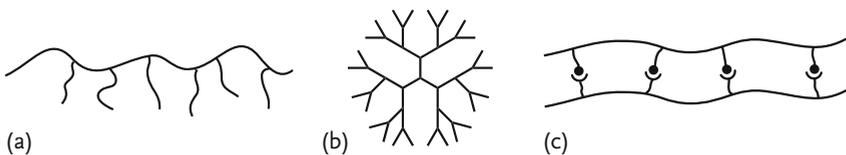
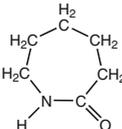


Abb. 1.2 Struktureller Aufbau eines kammförmigen Polymers (a), Dendrimers (b) und Leiterpolymers (c).

1. die Bezeichnung nach dem Ausgangsmonomer, das mit dem Zusatz „Poly“ versehen wird,
2. die offizielle Bezeichnung nach IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), nach der die Wiederholungseinheit als kleines organisches Molekül bezeichnet wird und – in Klammern gesetzt – mit dem Zusatz „Poly“ versehen wird,
3. die Bezeichnung durch einen Trivialnamen oder ein Kürzel.

Beispiele

Monomer	Polymer	Bezeichnung nach		
		(1)	(2)	(3)
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	$\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{)}_n\text{-}$	Polyethylen	Poly(methylen)	PE ^{a)}
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}$ 	$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n\text{-}$ 	Polystyrol	Poly(1-phenyl-ethylen)	PS
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}$ Cl	$\text{-(CH}_2\text{-CH)}_n\text{-}$ Cl	Polyvinylchlorid	Poly(1-chlor-ethylen)	PVC
$\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2$ O	$\text{-(OCH}_2\text{CH}_2\text{)}_n\text{-}$	Polyethylenoxid	Poly(oxyethylen)	PEO
	$\text{-(NC(CH}_2\text{)}_5\text{C(=O)H)}_n\text{-}$	Poly-ε-caprolactam	Poly(imino-2-oxo-pentamethylen)	Nylon 6, PA6

- a) auch LDPE (low density PE), HDPE (high density PE), LLDPE (linear low density PE), UHMWPE (ultrahigh molecular weight PE).

Ausnahmen von der Regel gelten für Polymere, die durch Stufenwachstum, Polymermodifizierung oder Copolymerisation entstehen. Bei diesen sind statt der Bezeichnung nach den Ausgangsmonomeren andere Bezeichnungen üblich.

Beispiele

Polymer/Copolymer	Häufigste Bezeichnung	Bezeichnung nach	
		(2)	(3)
	Polyethylenterephthalat	Poly(oxyethylenoxy-terephthaloyl)	PET
	Polyhexamethylenadipamid	Poly(imino-1,6-dioxohexamethylen-iminohexamethylen)	Nylon 66, PA 66
	Polyvinylalkohol	Poly(1-hydroxyethylen)	PVA
	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer	Poly(methylen-co-1-acetyloxyethylen)	EVA
	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Terpolymer	Poly(1-cyano-ethylen-co-buten-2-co-1-phenylethylen)	ABS

1.5

Molekulargewicht und Polymerisationsgrad

Mit Ausnahme der Dendrimere weisen Polymere kein exaktes Molekulargewicht auf, sondern eine Molekulargewichtsverteilung (Abb. 1.5). Die Molekulargewichtsverteilung erlaubt verschiedene Mittelwertbildungen, die unter Abschn. (a)–(c) näher erläutert sind. Weitere Begriffe, die aus der Molekulargewichtsverteilung resultieren, sind die Polydispersität eines Polymers sowie der mittlere Polymerisationsgrad. Sie werden unter Abschn. (d) diskutiert.

(a) Zahlenmittel des Molekulargewichts \bar{M}_n Das Zahlenmittel des Molekulargewichts \bar{M}_n ist gegeben durch

$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i$$

In dieser Beziehung bezeichnet x_i den Molenbruch der Polymermoleküle, die aus i Monomereinheiten bestehen. Das Molekulargewicht dieser Polymermoleküle ist M_i . Der Molenbruch x_i lässt sich beschreiben als das Verhältnis der Anzahl N_i der Polymermoleküle, die aus i Monomereinheiten bestehen, zur Gesamtzahl