

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

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

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

## 1.2

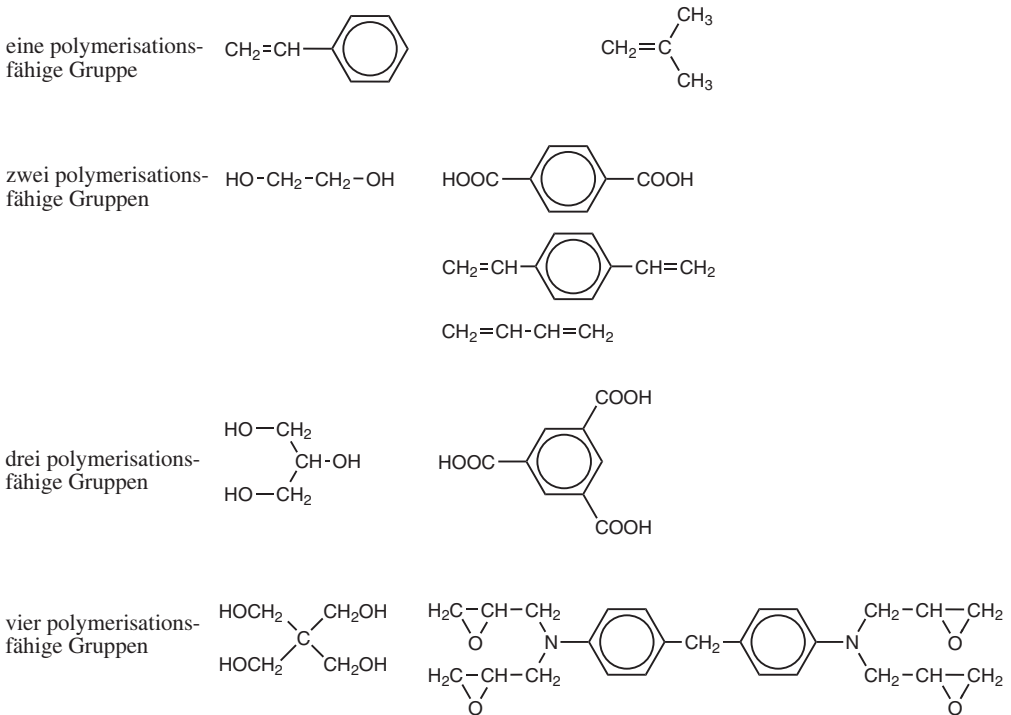
## Begriffsdefinitionen

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.

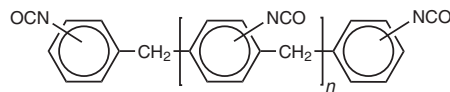
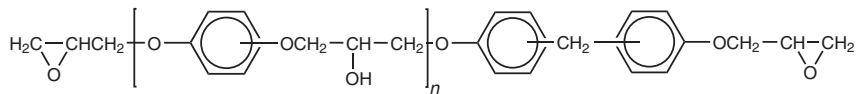
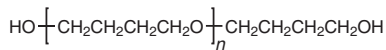
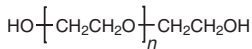
Der Begriff *Kunststoff* wird synonym für Polymer verwendet, bezieht sich aber häufig auf Gebrauchspolymere, die für technische und alltägliche Anwendungen aufbereitet (d. h. mit Additiven versehen) sind.

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

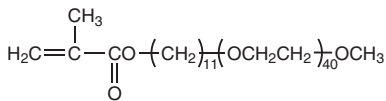


Neben den Monomeren sind auch *Präpolymere*, *Telechele* und *Makromonomere* in der Lage, zu polymerisieren. Präpolymere sind Oligomere oder kurzkettige Polymere, die zwei oder mehrere zur Polymerisation befähigende Gruppen tragen. Befinden sich die Gruppen ausschließlich an den Kettenenden, spricht 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.  $\alpha$ -Methacryloylundecyl- $\omega$ -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 gepfropften 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-

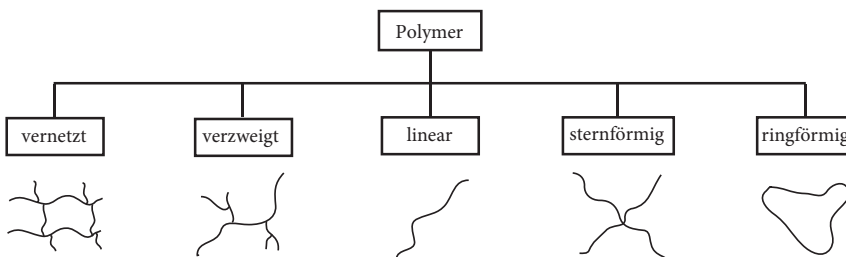


Abb. 1.1 Klassifizierung von Polymeren nach ihrem strukturellen Aufbau.

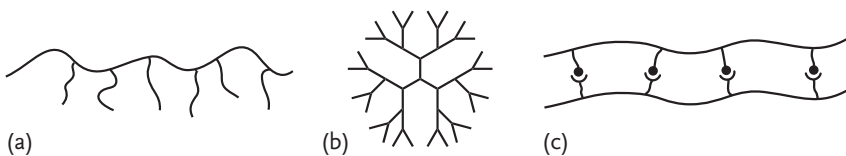


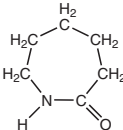


Abb. 1.2 Struktureller Aufbau eines kammförmigen Polymers (a), Dendrimers (b) und Leiterpolymers (c).



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)
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	$\left[ \text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$	Polyethylen	Poly(methylen)	PE <sup>a)</sup>
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}$ 	$\left[ \text{CH}_2-\text{CH} \right]_n$ 	Polystyrol	Poly(1-phenyl-ethylen)	PS
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}$   Cl	$\left[ \text{CH}_2-\text{CH} \right]_n$   Cl	Polyvinylchlorid	Poly(1-chlor-ethylen)	PVC
$\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2$   O	$\left[ \text{OCH}_2\text{CH}_2 \right]_n$	Polyethylenoxid	Poly(oxyethylen)	PEO
	$\left[ \text{NC}(\text{CH}_2)_5 \right]_n$   O   H	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  $\overline{M}_n$**  Das Zahlenmittel des Molekulargewichts  $\overline{M}_n$  ist gegeben durch

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

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



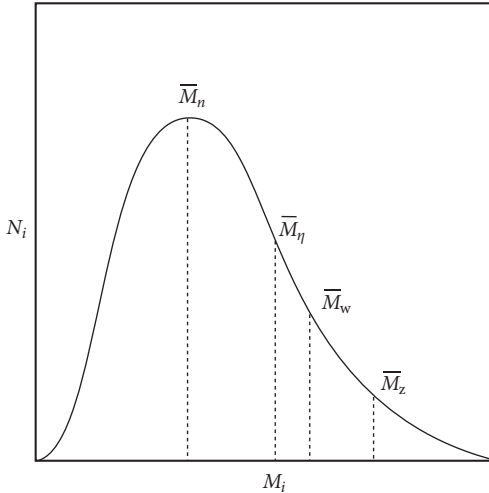


Abb. 1.5 Typische Molmassenverteilung eines synthetischen Polymers.

$N = \sum N_i$  aller Polymermoleküle:

$$x_i = \frac{N_i}{\sum N_i} = \frac{N_i}{N}$$

Mit der Definition für  $x_i$  folgt

$$\bar{M}_n = \sum x_i M_i = \sum M_i \frac{N_i}{N} = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i}$$

**(b) Gewichtsmittel des Molekulargewichts  $\bar{M}_w$**  Das Gewichtsmittel  $\bar{M}_w$  des Molekulargewichts ist gegeben durch

$$\bar{M}_w = \sum w_i M_i$$

In dieser Beziehung steht  $w_i$  für den Gewichtsbruch der Polymermoleküle, die aus  $i$  Monomereinheiten bestehen.  $w_i$  beschreibt das Verhältnis des Gewichts  $N_i M_i$  der Polymermoleküle zur gesamten Masse aller Polymermoleküle,  $\sum N_i M_i$ :

$$w_i = \frac{N_i M_i}{\sum N_i M_i}$$

Mit diesem Ausdruck für  $w_i$  folgt

$$\bar{M}_w = \frac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i}$$

**(c) Weitere Mittelwerte** Das Zentrifugenmittel  $\bar{M}_z$  wird durch Messung des Sedimentationsgleichgewichts in der Ultrazentrifuge bestimmt. Es hat keine anschauliche Bedeutung. Es ist definiert als

$$\bar{M}_z = \frac{\sum N_i M_i^3}{\sum N_i M_i^2} = \frac{\sum w_i M_i^2}{\sum w_i M_i}$$

Das *Viskositätsmittel*  $\overline{M}_\eta$  wird durch Messung der Grenzviskositätszahl  $[\eta]$  einer Polymerlösung bestimmt. Es hat ebenfalls keine anschauliche Bedeutung. Es ist definiert als

$$\overline{M}_\eta = \left( \frac{\sum w_i M_i^a}{\sum w_i} \right)^{1/a}$$

wobei  $a$  eine Zahl zwischen 0 und 1 ist. Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen ergibt sich für die Reihe der Molekulargewichtsmittelwerte

$$\overline{M}_n < \overline{M}_\eta < \overline{M}_w < \overline{M}_z$$

Die Berechnung der Molekulargewichtsmittelwerte wird durch das folgende Beispiel erläutert. Ein Polymer A bestehe aus zehn Molekülen:

ein Molekül habe das Molekulargewicht	100 000
fünf Moleküle das Molekulargewicht	200 000
drei Moleküle das Molekulargewicht	500 000
und ein Molekül habe das Molekulargewicht	1 000 000.

$\overline{M}_n$  und  $\overline{M}_w$  lassen sich dann wie folgt berechnen:

$$\overline{M}_n = \frac{(1 \cdot 10^5) + (5 \cdot 2 \cdot 10^5) + (3 \cdot 5 \cdot 10^5) + (1 \cdot 10^6)}{1 + 5 + 3 + 1} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\overline{M}_w = \frac{[1 \cdot (10^5)^2] + [5 \cdot (2 \cdot 10^5)^2] + [3 \cdot (5 \cdot 10^5)^2] + [1 \cdot (10^6)^2]}{(1 \cdot 10^5) + (5 \cdot 2 \cdot 10^5) + (3 \cdot 5 \cdot 10^5) + (1 \cdot 10^6)} \text{ g mol}^{-1}$$

$$\overline{M}_w = 5,45 \cdot 10^5 \text{ g mol}^{-1}$$

$\overline{M}_z$  errechnet sich zu  $7,22 \cdot 10^5 \text{ g mol}^{-1}$ .

**(d) Polydispersität und Polymerisationsgrad** Die Breite einer Molekulargewichtsverteilung wird durch den Quotienten  $\overline{M}_w/\overline{M}_n$ , die sogenannte *Polydispersität*, angegeben. Gelegentlich wird auch die *Uneinheitlichkeit*  $U$  verwendet:

$$U = \frac{\overline{M}_w}{\overline{M}_n} - 1$$

Bei vielen Polymerisationsreaktionen werden Polydispersitäten von ungefähr 2 erhalten. Monodisperse Polymere mit  $\overline{M}_w/\overline{M}_n = 1$  werden nur in Ausnahmefällen annähernd erhalten, z. B. bei der lebenden anionischen Polymerisation bei sehr hohen Molekulargewichten (vgl. Abschn. 2.2.2.1.4) oder bei der Herstellung von Dendrimeren.

Der mittlere Polymerisationsgrad  $\overline{X}$  ist gegeben durch das Verhältnis des mittleren Molekulargewichts  $\overline{M}$  des Polymers zum Molekulargewicht  $M_0$  des Ausgangsmonomers:

$$\overline{X} = \frac{\overline{M}}{M_0}$$

Mit  $\overline{M}_n$  und  $\overline{M}_w$  lassen sich Zahlen- und Gewichtsmittel des Polymerisationsgrades definieren:

$$\overline{X}_n = \frac{\overline{M}_n}{M_0}$$

$$\overline{X}_w = \frac{\overline{M}_w}{M_0}$$

Am gebräuchlichsten ist das Zahlenmittel des Polymerisationsgrades  $\overline{X}_n$ .

## 1.6

### Thermisches Verhalten: $T_g$ und $T_m$

Bei tiefen Temperaturen sind Polymere fest. In fester Phase können sie entweder kristallin oder amorph vorliegen. Meistens treten beide Zustände auf, d. h., es koexistieren kristalline und amorphe Bereiche. Die Polymere werden dann als „teilkristallin“ bezeichnet. Langsames Abkühlen fördert die Kristallisation, während rasches Abkühlen („Abschrecken“) die Bildung amorpher Bereiche begünstigt. Beim Aufwärmen teilkristalliner Proben treten zwei charakteristische Umwandlungstemperaturen auf:

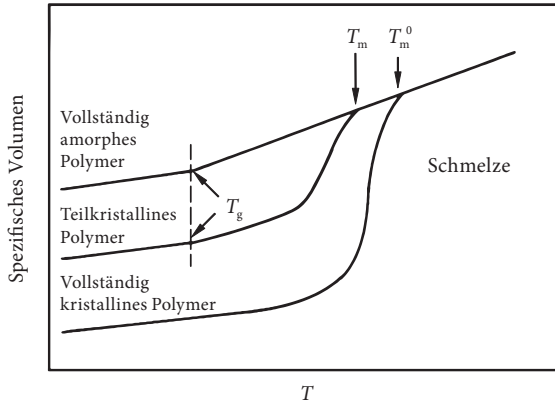
- die Glastemperatur  $T_g$  (Umwandlung Glaszustand  $\rightleftharpoons$  gummiähnlicher Zustand),
- die Schmelztemperatur  $T_m$  (Umwandlung kristalline Phase  $\rightleftharpoons$  isotrope Schmelze).

$T_m$  tritt in der Regel nicht als scharfer Schmelzpunkt, sondern als mehr oder weniger breiter Schmelzbereich auf, weil das Polymer verschieden große Kristallite enthält, die verschieden rasch aufschmelzen. Auch bewirkt die Teilkristallinität eine Absenkung von  $T_m$ . Der Schmelzpunkt  $T_m$  eines teilkristallinen Polymers liegt immer niedriger als der ideale Schmelzpunkt eines perfekt kristallinen Polymers,  $T_m^0$ . Beim Überschreiten von  $T_g$  erweichen glasförmig erstarrte, amorphe Bereiche und gehen in einen Zustand erhöhter Flexibilität („Gummizustand“) über. Solange  $T_m$  noch nicht erreicht ist, kann Rekristallisation eintreten.  $T_g$  und  $T_m$  lassen sich z. B. über Änderungen des spezifischen Volumens (Abb. 1.6) oder mit der Differenzialthermoanalyse (DTA, DSC) bestimmen (Abb. 1.7, vgl. auch Abschn. 4.2.3).

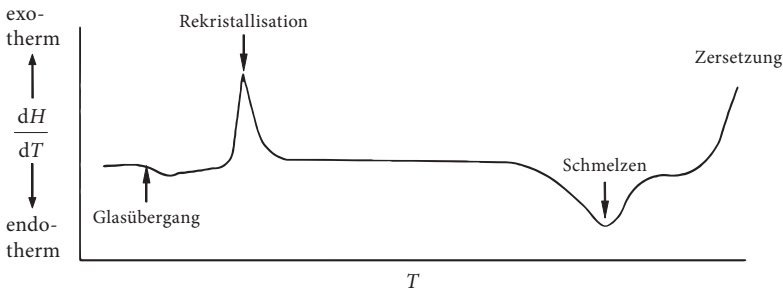
## 1.7

### Mechanisches Verhalten

Kunststoffe werden auch nach ihrem mechanischen Verhalten eingeteilt. Ein einfaches Experiment zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens ist der Zugversuch, der die Dehnung  $\varepsilon$  eines Probenkörpers als Funktion der angelegten Zug-



**Abb. 1.6** Schematische Darstellung der Änderung des spezifischen Volumens eines Polymers mit der Temperatur  $T$  für eine vollständig amorphe Probe, eine teilkristalline Probe und ein vollständig kristallines Material [2].



**Abb. 1.7** Schematische DSC-Aufheizkurve eines teilkristallinen Polymers mit Glasübergang, exothermer Rekristallisation, endothermem Schmelzen und exothermer Zersetzung.

spannung  $\sigma$  misst. Die Form des Spannungs-Dehnungs-Diagramms (Abb. 1.8) erlaubt es, zwischen steifen (energieelastischen) Polymeren, plastisch verformbaren (viskoelastischen) Polymeren und gummielastischen, elastomeren (entropieelastischen) Polymeren zu unterscheiden. Aus der Anfangssteigung lässt sich mit dem Hooke'schen Gesetz

$$\sigma = E \varepsilon$$

der  $E$ -Modul des Polymers bestimmen. Wie Abb. 1.8 zeigt, haben Elastomere (Gummis) den niedrigsten  $E$ -Modul, während energieelastische Polymere (Hartplastik, Fasern) die höchsten Modulwerte besitzen.

Einige Beispiele für thermoplastische, elastomere und faserbildende Kunststoffe sind am Ende des Buches zusammengestellt.

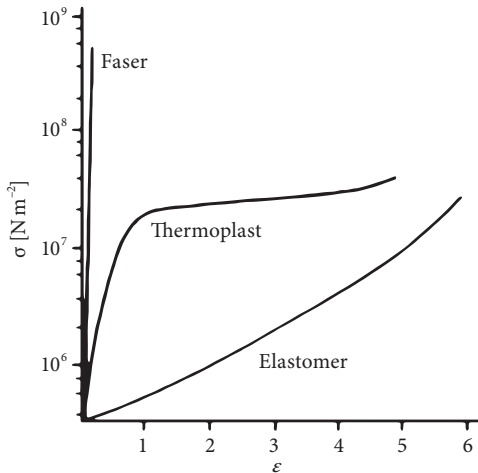


Abb. 1.8 Typische Spannungs-Dehnungs-Diagramme verschiedener Polymere.

## 1.8 Verarbeitung

Die Verarbeitung von Polymeren hängt von ihrem thermischen und mechanischen Verhalten ab.

*Thermoplaste* sind lineare Polymere, die oberhalb  $T_g$  oder  $T_m$  fließfähig werden und durch Extrusion und Spritzgießen verarbeitet werden (Beispiele am Ende des Buches).

*Duroplaste* oder *Thermosets* sind stark vernetzte Polymere, die durch Gießen der Monomere (oder Oligomere) in eine Form und anschließende (oder simultane) thermische Vernetzung in der Form hergestellt werden. Beispiele für Duroplaste sind Epoxidharze, Polyesterharze, Phenolharze und Aminoharze.

*Elastomere* sind schwach vernetzte Polymere. Sie werden entweder wie die Duroplaste durch simultane Verformung und thermische Härtung von Monomeren und Präpolymeren oder durch nachträgliche Vernetzung („Vulkanisation“) linearer Polymerer hergestellt. Beispiele für Elastomere sind Gummis auf Polyisopren- und Polybutadienbasis, schwach vernetzte Polyurethane und Silikone (Beispiele am Ende des Buches).

## 1.9 Das Wichtigste im Überblick

1. Die Makromolekulare Chemie begann mit der Vulkanisation von Kautschuk. Das erste vollsynthetische Polymer war Bakelit, ein Phenol-Formaldehyd-Harz.
2. Polymere sind  $n$ -Mere der Monomere, die kovalent miteinander verbunden sind.

3. Polymere werden bezeichnet (a) nach dem Ausgangsmonomer mit dem Zusatz „Poly“, (b) nach IUPAC-Regeln und (c) durch Trivialnamen oder Kürzel.
4. Polymere haben kein exaktes Molekulargewicht, sondern eine Molekulargewichtsverteilung. Man unterscheidet das Zahlenmittel, Gewichtsmittel, Viskositätsmittel und Zentrifugemittel des Molekulargewichts.
5. Der Polymerisationsgrad ist der Quotient aus dem Molekulargewichtsmittelwert des Polymers und dem Molekulargewicht der Monomereinheit. Die Polydispersität ist das Verhältnis von Gewichtsmittel zu Zahlenmittel des Molekulargewichts.
6. Das thermische Verhalten von Polymeren wird durch Glas- und Schmelztemperatur beschrieben. Der Schmelzpunkt ist unscharf und hängt von der Probenvorgeschichte ab.
7. Polymere zeigen unterschiedliche mechanische Verhaltensweisen: Energieelastisches, viskoelastisches und entropieelastisches Verhalten.