

Einführung in die Kunststoffverarbeitung

Walter Michaeli

ISBN 3-446-40580-1

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/3-446-40580-1> sowie im Buchhandel

2 Aufbau und Einteilung der Kunststoffe

2.1 Aufbau der Kunststoffe

Das Wort „Kunststoff“, in dem die Definition „künstlicher Stoff“ steckt, wurde für eine zunächst noch nicht klar definierte Stoffgruppe erstmalig von der Zeitschrift Kunststoffe (gegründet 1911) eingeführt und so im deutschen Sprachraum festgeschrieben.

Die ersten Kunststoffe wurden in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts durch chemische Umwandlung hochmolekularer Naturstoffe entwickelt (Galalith, Celluloid, Kunstseiden), zum Teil als Ersatz der teuren und hochwertigen Naturprodukte. 1905 gelang es *Baekeland*, die Harzbildung aus Formaldehyd und Phenolen so zu steuern, dass die dabei gebildeten Produkte als Werkstoffe verarbeitet werden konnten. Die ersten Versuche zur Herstellung eines synthetischen Elastomers („Gummi“, Methyl-Kautschuk) – wiederum als Ersatz des durch die Blockade im 1. Weltkrieg nicht mehr zur Verfügung stehenden Naturkautschuks – wurden in Deutschland unternommen. Die Entwicklung der Kunstfasern geht vor allem auf Arbeiten von *Carothers* (USA) zurück, dem es gelang, aus Dicarbonsäuren und Diaminen Polyamide zu erhalten, welche sich zu Fasern verspinnen ließen.

Ein echter Fortschritt allerdings wurde durch das Fehlen jeglicher Grundkenntnisse über die Struktur dieser Werkstoffe verhindert. Lange Zeit war man allgemein der Ansicht, dass auch Stoffe wie Cellulose, Gummi oder Vinylpolymere im wesentlichen aus Molekülen von relativ niedriger Molekülmasse bestehen würden. Man sah die besonderen Eigenschaften dieser Materialien als eine Folge der Zusammenlagerung der Moleküle zu Kolloidteilchen, so genannten Micellen, an.

Erst durch die energische Pionierarbeit des deutschen Chemikers *Hermann Staudinger*, der 1922 den Begriff „*Makromolekül*“ einführte, begann der eigentliche Fortschritt. *Staudinger* erkannte, dass die Hochpolymeren aus Molekülen von sehr hoher Molmasse, den so genannten Makromolekülen, aufgebaut sind, in welchen die einzelnen Kohlenstoffatome untereinander in genau derselben Weise miteinander verknüpft sind wie in irgendeinem niedermolekularen organischen Stoff. Für diese die Polymerwissenschaft begründenden Arbeiten erhielt *Staudinger* 1953 den Nobelpreis. Der „Normenausschuss Kunststoffe“ schlug später für diese Werkstoffklasse folgende Begriffsbestimmung vor:

„Kunststoffe sind Materialien, deren wesentliche Bestandteile aus solchen makromolekularen organischen Verbindungen bestehen, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten entstehen. Sie sind in der Regel bei der Verarbeitung unter bestimmten Bedingungen (Wärme, Druck) plastisch formbar oder sind plastisch geformt worden“.

Anstelle von „Kunststoff“ findet man auch häufig in der Literatur die Bezeichnung „Plaste“, das ist ein in der ehemaligen DDR offiziell eingeführter Begriff für Kunststoffe.

2.1.1 Herstellung von Kunststoffen

Die Herstellung von Kunststoffen basiert auf drei Reaktionsvorgängen:

- Polymerisation,
- Polykondensation und
- Polyaddition.

erste Kunststoffe

Makromoleküle

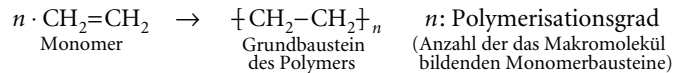
Definition:
„Kunststoff“

2.1.1.1 Polymerisation

Monomere als Grundbausteine

Darunter versteht man eine *Kettenreaktion*, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromolekülen (Polymeren) verknüpft werden. Es bilden sich hierbei keine Reaktionsnebenprodukte.

Die niedermolekularen Ausgangsmoleküle bezeichnet man als *Monomere*. Sie besitzen aufspaltbare Doppel- bzw. auch Dreifachbindungen. Als einfaches Beispiel sei die Entstehung von Polyethylen erwähnt:



Jedes Monomer geht bei der Polymerisation in einen Grundbaustein der Polymerkette über. Die Anzahl n der Grundbausteine, die eine Molekülkette bilden, nennt man auch Polymerisationsgrad. Die entstehenden Moleküle bilden das Polymer, d. h. den Kunststoff.

Der Ausdruck „Kettenreaktion“ hat nichts damit zu tun, dass in diesem Falle Molekülketten entstehen. Er bezeichnet vielmehr die Kinetik einer Reaktion, die aus drei zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen bzw. Reaktionsteilschritten besteht:

- Startreaktion,
- Kettenfortpflanzungsreaktion und
- Abbruchreaktion.

Je nach Art der reaktionsfähigen Teilchen, die die Polymerisation auslösen, unterscheidet man die folgenden Polymerisationsarten voneinander:

- radikalische Polymerisation,
- kationische Polymerisation,
- anionische Polymerisation,
- Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen.

(Die Reaktionsteilschritte für die Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen können nicht ohne Einschränkung formuliert werden, da es bis heute noch nicht gelungen ist, den Reaktionsablauf dieser Polymerisationsart restlos aufzuklären.)

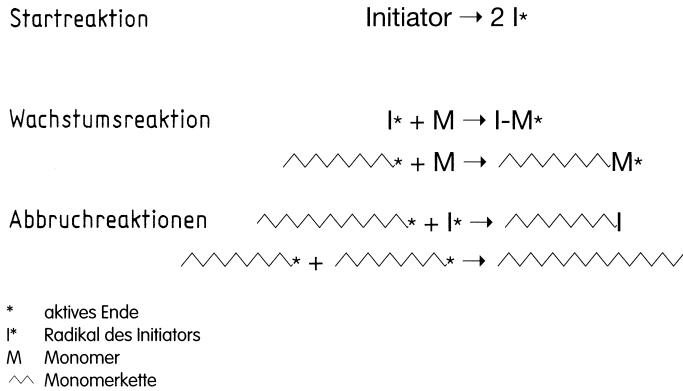
Radikalische Polymerisation

Initiatoren bilden Radikale

Zum Start der Polymerisation zerfallen so genannte Initiatoren durch Energiezufuhr in sehr reaktionsfähige Radikale (I^*), die dann mit den Monomeren (M) reagieren, z. B. Peroxide wie Wasserstoffperoxid (H_2O_2) oder Dibenzoylperoxid.

Reaktionsablauf (Bild 2.1.1):

1. Startreaktion, d. h. die Initiatoren zerfallen in ihre Radikale (I^*) durch Energiezufuhr.
2. Wachstumsreaktion:
 - a) Die Radikale reagieren nun mit doppelt gebundenem Kohlenstoff.
 - b) Die neue Gruppe reagiert weiter mit anderen Doppelbindungen.
3. Abbruch, d. h. die Polymerisation kommt zum Stillstand durch:
 - a) Reaktion zweier Radikal-Enden von Polymerketten,
 - b) Reaktion eines Radikal-Endstücks von Polymerketten mit dem Radikal des Initiators,
 - c) Übertragung eines Wasserstoffatoms von einem Makroradikal zum anderen oder
 - d) Eliminierung eines bindungsfähigen Wasserstoffatoms.

**Bild 2.1.1** Polymerisation

Ionische Polymerisation

Im Gegensatz zur radikalischen Polymerisation, bei der die wachsenden Ketten an einem Ende eine reaktive Stelle (Radikal) besitzen, liegen letztlich bei der ionischen Polymerisation am Kettenende immer positiv (Kationen) oder negativ (Anionen) geladene Ionen vor.

Reaktivität
durch Ionen

Kationische Polymerisation (Bild 2.1.2)

Katalysatoren für die kationische Polymerisation sind Säuren (z. B. Schwefelsäure H_2SO_4 ; Phosphorsäure H_3PO_4) und so genannte Friedel-Crafts-Katalysatoren (z. B. Bortrifluorid BF_3 ; Aluminiumchlorid AlCl_3) in Verbindung mit Wasser. Diese Substanzen geben Protonen ab, die infolge ihrer positiven Ladung elektronenanziehend sind.

Protonenabgabe

Kationische Polymerisation von Isobutylen mit Bortrifluorid/Wasser zu Polyisobutylen, Bild 2.1.2:

1. Startreaktion, d. h. die Ionenbildung mit saurem Katalysator,
2. Wachstumsreaktion,
3. Kettenabbruch; dieser kann durch Anlagerung eines Anions (z. B. aus dem Katalysator)

erfolgen, wenn man nicht eine willkürliche Beendigung der Reaktion durch Zusatz von Basen oder analogen Stoffen herbeiführt.

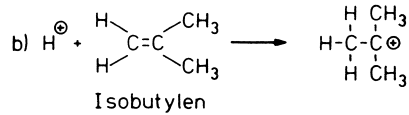
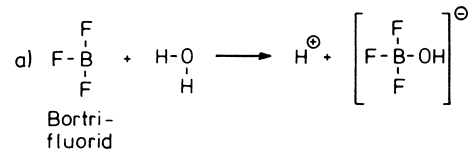
Anionische Polymerisation

Katalysatoren für die anionische Polymerisation sind starke Basen (z. B. Natronlauge, NaOH ; Kalilauge, KOH). In der Praxis werden häufig starke Basen auf Basis der metallorganischen Verbindungen (z. B. Natriumalkoholate, R-ONa ; Natriumamid, NaNH_2) angewendet. Diese Substanzen sind nucleophil („kernsuchend“). Sie sättigen mit ihrem freien Elektronenpaar das positiv polarisierte C-Atom der Monomeren ab. Dadurch entsteht ein Anion, das sofort mit weiteren Monomeren eine wachsende Kette ergibt. Durch Anlagerung eines Protons, z. B. aus einem Lösungsmittelmolekül, erfolgt jeweils der Kettenabbruch.

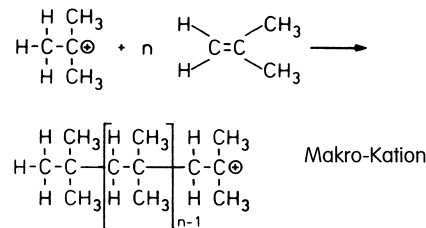
Protoneneinfang

Die anionische Polymerisation von Acrylsäuremethylester mit Natriumamid zu Polymethacrylat zeigt Bild 2.1.3.

1) Startreaktion



2) Wachstumsreaktion

**Bild 2.1.2** Kationische Polymerisation

Polymerisation mit Übergangsmetallverbindungen

**Metallkomplexe
als Katalysator**

Die große Bedeutung dieser Polymerisationsmethode besteht darin, dass sehr regelmäßig aufgebaute Ketten entstehen. Das nach diesem Verfahren (Niederdruckverfahren) hergestellte Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) hat z. B. im Unterschied zu dem unter hohem Druck radikalisch hergestellten Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) keine oder nur wenige Kettenverzweigungen und damit infolge stärkerer Kristallisation eine höhere Dichte, Bild 2.1.4. Lineares Polyethylen niedriger Dichte (PE-LLD), das nach verschiedenen Verfahren polymerisiert werden kann, hat nur sehr kurze Seitenäste, diese aber in großer Anzahl.

Als *Katalysatoren* verwendet man so genannte *Metallkomplexverbindungen*, z. B. ein Gemisch aus Titantrichlorid und Triethylaluminium.

Der Mechanismus dieser Polymerisation ist noch nicht in allen Einzelheiten bekannt. Jedoch muss man aufgrund unterschiedlicher Polymerisationsmöglichkeiten sowie verschiedener Kettenabbruchreaktionen, welche parallel zueinander ablaufen, davon ausgehen, dass der so synthetisierte Kunststoff nicht aus Ketten mit einer einheitlichen Länge (Molekulargewicht) besteht. Man findet in Kunststoffen immer eine mehr oder weniger breite Molekulargewichtsverteilung der Ketten vor. Diese beeinflusst ganz wesentlich das Eigenschaftsbild des Werkstoffes.

Die Technik der Polymerisation

**Aktivierung durch
Energiezufuhr**

Um eine Kettenbildung zu starten, ist eine gewisse Aktivierungsenergie, meist in Form von zugeführter Wärme bzw. Strahlung, notwendig. Man unterscheidet folgende technische Polymerisationsverfahren (s. auch Tab. 2.1):

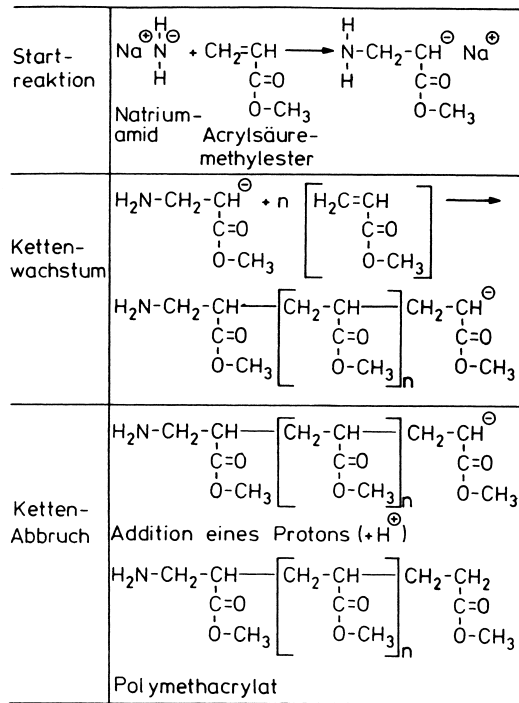


Bild 2.1.3 Anionische Polymerisation

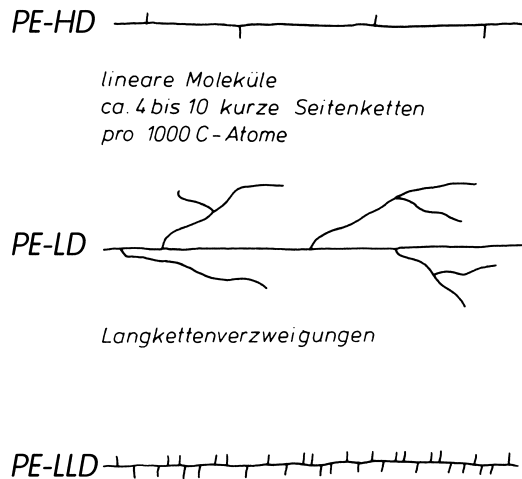


Bild 2.1.4 Molekülaufbau der verschiedenen PE-Typen

Tabelle 2.1 Übersicht über technische Polymerisationsmethoden

Polymerisationsmethode	Merkmale
Substanzpolymerisation	Direkte Polymerisation der Monomeren unter Druck und Temperatur (ohne Zusatzflüssigkeit).
Lösungspolymerisation	Die Monomeren werden in einem Lösungsmittel gelöst und polymerisiert. Das Polymerisat bleibt gelöst.
Fällungspolymerisation	Die Monomeren werden in einem Lösungsmittel gelöst. Das Polymerisat ist in ihm unlöslich und fällt aus.
Emulsionspolymerisation	Die Monomeren werden in einem so genannten Emulgator in feinste Verteilung gebracht und polymerisiert. Das Polymerisat bleibt dispergiert.
Perl(Suspensions-)polymerisation	Die Monomeren werden durch Rühren in Wasser zu kleinen Tröpfchen zerteilt und polymerisiert. Das Polymerisat fällt aus.

a) *Substanzpolymerisation (Masse- oder Blockpolymerisation)*

spontane Reaktion

Sie besteht darin, dass die Monomeren zusammen mit Initiatoren und Katalysatoren ohne Zugabe von Flüssigkeiten unter bestimmten Reaktionsbedingungen, wie Druck und Temperatur, spontan miteinander reagieren. Das größte Problem stellt naturgemäß die Beherrschung der Reaktionswärme dar. Man beherrscht die Wärmeabfuhr hier durch Beschränkung auf rohrförmige Reaktionsräume nicht zu großer Querschnitte. Das wichtigste Verfahren dieser Art ist die Hochdruckpolymerisation von Polyethylen, bei welcher das gasförmige Ethylen unter Druck von ca. 2000 bar und Temperaturen von 200 °C in Hochdruckreaktoren – Rohrleitungen mit sorgfältigster Temperierung – polymerisiert wird.

Styrol, Methacrylsäuremethylester, Butadien und Vinylchlorid polymerisieren ebenfalls auf diese Weise.

In einigen wenigen Fällen lässt sich eine Massepolymerisation direkt in Formen (in situ) ausführen. Die schwierige Temperaturführung und der Volumenschwund (der oft auch bei anderen Gelegenheiten in der Kunststoffverarbeitung Schwierigkeiten bereitet) werfen jedoch Probleme auf, die das Verfahren nur bei besonders hochwertigen Polymerisaten, wie z. B. organischen Gläsern aus Polymethylmethacrylat (PMMA), sich in größerem Maße hat durchsetzen lassen.

b) *Lösungspolymerisation*

Polymerisation
in Lösung

Hier liegen die Monomeren und auch die entstehenden Polymeren zwecks einfacherer Temperaturführung in einer flüssigen Umgebung gelöst vor. So entstehen z. B. Polyvinylacetat (PVA), Niederdruckpolyethylen und Polyacrylsäure. Nach der Polymerisation muss das Lösungsmittel gegebenenfalls durch Verdampfung wieder entfernt werden.

Vielfach werden die entstandenen Polymerisatlösungen auch direkt verwendet, z. B. für Klebstoffe.

c) *Fällungspolymerisation*

Ausfällen
aus der Lösung

Bei diesem Verfahren werden die Monomeren in einem Lösungsmittel gelöst und polymerisiert. Das entstandene Polymer ist – im Gegensatz zum Monomer – unlöslich und fällt aus. Dieses Verfahren ist wirtschaftlicher als die Lösungspolymerisation, da es schneller abläuft und das Lösungsmittel unmittelbar wieder verwendbar ist. Nach diesem Verfahren werden z. B. Niederdruckpolyethylen und Polyisobutylene hergestellt.

d) Emulsionspolymerisation

Bei der Emulsionspolymerisation werden wasserunlösliche Monomere in Wasser emulgiert. Für die Stabilisierung der Emulsion werden Emulgatoren (z. B. Seifen) eingesetzt. Zum Start der Polymerisation werden wasserlösliche Initiatoren zugesetzt. Diese lagern nun Monomermoleküle unter Ausbildung der Polymerkette an. Die Polymerisation findet dabei nicht in den Monomertröpfchen statt, sondern in den Seifenmizellen. Es liegt folglich ein dreiphasiges Gemisch aus flüssigem Monomer und festem Polymer in Wasser dispergiert vor. Das Polymer selbst fällt schließlich als wässrige Dispersion an. Ein anschließender Trennungsprozess liefert ein sehr feinpulvriges Material (z. B. das so genannte E-PVC). Nicht immer ist ein anschließender Trennungsprozess notwendig; teilweise werden die anfallenden Dispersionen direkt weiterverarbeitet (Anstrichmittel, Klebstoff oder Appretur).

**Polymerisation
in einer Emulsion**

Aus technischen Gründen ist eine vollständige Entfernung des Emulgators in der Regel nicht möglich. Die im Polymerisat verbleibenden Emulgatorrückstände können dabei manchmal einen negativen Einfluss auf die Polymereigenschaften haben.

e) Suspensionspolymerisation (Perlpolymerisation)

Bei der Suspensionspolymerisation werden Monomere und Initiatoren durch entsprechend stärkeres mechanisches Rühren in Wasser fein verteilt. Das Problem, den Emulgator zu entfernen, existiert hierbei also nicht. Das Polymerisat fällt in Form kleiner Perlchen an, die leicht von Wasser getrennt werden können. Man erhält hochwertige Polymerisate. Die Perlen lassen sich unter Umständen später direkt als Granulat verwenden. Auf diese Weise lassen sich z. B. Polyacrylnitril und Polyvinylacetat herstellen.

**Polymerisation
in Suspension**

2.1.1.2 Polykondensation

Unter Polykondensation versteht man eine Stufenreaktion, bei der Makromoleküle („Polykondensate“) unter Abspaltung von Nebenprodukten (z. B. Wasser, Ammoniak, Alkohol) gebildet werden. Die Ausgangssubstanzen müssen keine Doppelbindungen enthalten wie bei der Polymerisation, sondern so genannte „funktionelle Gruppen“, d. h. Atomgruppierungen, die besonders reaktionsfähig sind; dies sind z. B.

**Reaktions-
mechanismus**

- Hydroxyl-Gruppe [-OH],
- Carbonyl-Gruppe [-C=O],
- Carboxyl-Gruppe [-COOH],
- Amino-Gruppe[-NH₂].

Man kann lineare, verzweigte und vernetzte Polykondensate herstellen, je nachdem, ob es sich bei den Monomeren um bi-, tri- oder höherfunktionelle Verbindungen handelt, d. h. ob sie zwei, drei oder mehrere funktionelle Gruppen besitzen (Bild 2.1.5).

Die Polykondensation stellt eine echte chemische Gleichgewichtsreaktion dar. Werden die Nebenprodukte nicht abgeführt, so hört die Reaktion auf, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen Monomeren auf der einen sowie Polymeren und Abspaltprodukten auf der anderen Seite eingestellt hat. Die Reaktion lässt sich also in Stufen durchführen, d. h. sie kann unterbrochen und wieder in Gang gesetzt werden. Dies wird vielfach ausgenutzt.

**Gleichgewichts-
reaktion**

Das Abführen der Nebenprodukte wirft aber oft auch technische Probleme auf, z. B. Blasenbildung, die den Einsatz von Polykondensationsprodukten nicht immer angezeigt erscheinen lassen, z. B. beim Vergießen oder Laminieren.

Die wichtigsten Gruppen der Polykondensate sind: Melaminharze, Harnstoffharze, Phenolharze, Polyamide, Polycarbonate, Polyester, Silicone.

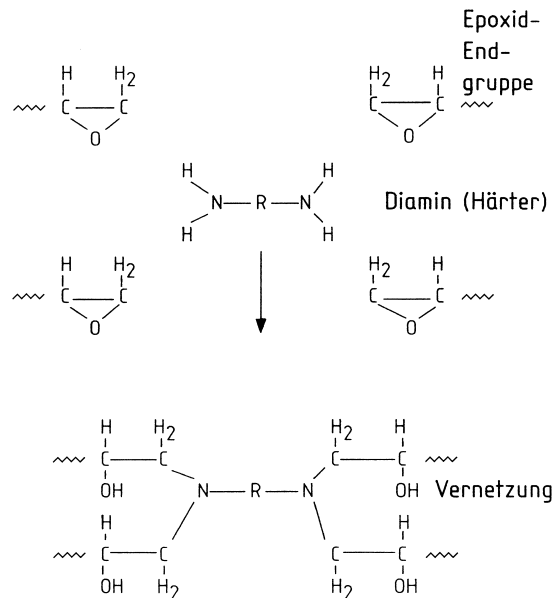


Bild 2.1.7 Vernetzungsreaktion der Epoxidharze

moleküle entstehen. Handelt es sich aber um mehrfunktionelle Partner, können die Monomeren also mehrere Bindungen tätigen, so verknüpfen sich die Ketten auch untereinander. Es entsteht ein Netzwerk (Bild 2.1.7).

2.1.2 Bindungskräfte in Polymeren

Innerhalb eines Kunststoffs wirken an seinen Makromolekülen *Haupt- und Nebenvalenzkräfte* und bestimmen seine Eigenschaften. Bei den Hauptvalenzkräften handelt es sich um die chemischen Atombindungen, auch Kovalent- oder Elektronenpaar-Bindungen genannt. Je nach Anzahl der Bindungen zwischen zwei Atomen unterscheidet man zwischen *Einfach-, Doppel- und Dreifachbindung*.

Die Nebenvalenzkräfte, auch zwischenmolekulare Kräfte oder *Van der Waalsche Kräfte* genannt, sind im Gegensatz zu Hauptvalenzkräften von physikalischer Natur. Zwischenmolekulare Kräfte sind die zwischen den Makromolekülen wirksamen Kräfte, die auf der Verteilung und Bewegung der Elektronen beruhen. Sie lassen sich ihrem Ursprung nach in folgende Gruppen einteilen:

- Dispersionskräfte,
- Dipolkräfte,
- Wasserstoffbrückenbindung.

Die Stärke der Nebenvalenzkräfte und damit ihre Bedeutung für die Moleküleigenschaften sind abhängig von der Größe, der Gestalt und der Ordnung der Makromoleküle, ferner von der Molekülart und den äußeren Einflüssen. Beim Erwärmen z. B. werden Nebenvalenzkräfte zunehmend überwunden. Das geschieht bei einer für jedes Molekül charakteristischen Temperatur.

Haupt- und Nebenvalenzkräfte

Wirkung der Temperatur

a) Dispersionskräfte

$$F \sim r^{-6}$$

Dispersionskräfte sind die allgemein in Materie wirkenden Anziehungskräfte. Die Bindungsenergie dieser Dispersionskräfte ist umgekehrt proportional dem Abstand der Moleküle zur sechsten Potenz und liegt im Bereich < 10 kJ/mol. Erwartungsgemäß sind die Dispersionskräfte besonders groß in kristallinen Bereichen, weil hier die Moleküle die dichtestmögliche Packung, d. h. die größte Nähe zueinander besitzen. Dies ist die Ursache der vor allem im hochverstreckten Zustand beachtlichen Festigkeit von Kunststoffen.

b) Dipolkräfte

Ladungs-
verschiebung

Gehen zwei Atome mit verschiedener Elektronegativität eine kovalente Bindung ein, so entsteht ein Dipol. Ein Dipol zeichnet sich dadurch aus, dass die Elektronenverteilung permanent unsymmetrisch ist, d. h. das elektronegative Atom zieht die Elektronen stärker an und ist infolgedessen negativ polarisiert, das andere elektroneutralere Bindungsatom dagegen positiv.

Fernwirkung

Dipolkräfte werden durch Wärmebewegung geschwächt, weil die Dipole aus ihrer Lage gedreht werden können. Durch Verknäuelungen von Seitenketten kommen sich Dipole oft räumlich näher und ihre Wirkung erstreckt sich über größere Molekülabstände hinweg.

Polare Makromoleküle entstehen, wenn in den Molekülketten die Ladungsschwerpunkte verschoben sind. Bei symmetrischem Aufbau der Makromoleküle (z. B. Polyethylen) liegen die Ladungsschwerpunkte in der Molekülachse, sie sind infolgedessen unpolar.

c) Wasserstoffbrücken

Elektronegativität

Wasserstoffbrücken bestehen zwischen Dipolen, die aus einem positiv polarisierten Wasserstoffatom und einem elektronegativeren Atom, z. B. O, Cl, N oder F, aufgebaut sind. Aufgrund der stark ausgeprägten Wirkung der Dipolkräfte ist die Bindungsenthalpie der Wasserstoffbrücken im Vergleich zu den anderen Nebervalenzkräften besonders hoch. Die entstehenden Anziehungskräfte bedingen die Festigkeit vieler Polymere wie Cellulose, Proteine, Polyamide und Polyurethane, Bild 2.1.8.

hohe Kräfte

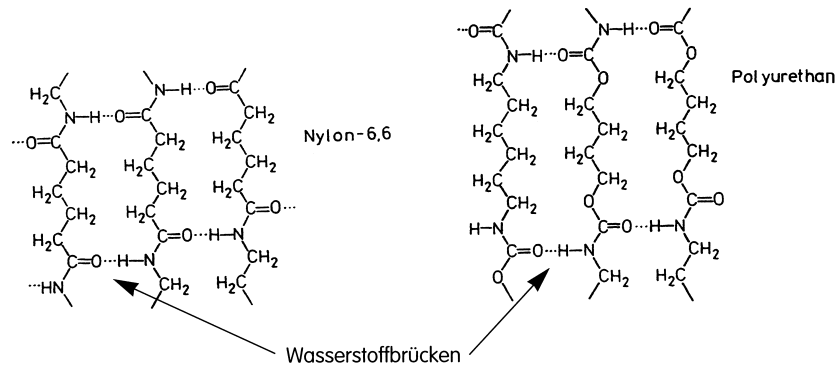


Bild 2.1.8 Wasserstoffbrücken in Polyamid 66 und Polyurethan

2.2 Einteilung der Kunststoffe

Die Einteilung der Kunststoffe in bestimmte Werkstoffgruppen ergibt sich aus der Struktur und dem Bindungsmechanismus der Makromoleküle, aus denen die Kunststoffe aufgebaut sind. Je nach Art der Makromoleküle, Bild 2.2.1, unterscheidet man:

- lineare Kettenmoleküle Thermoplaste
- verzweigte Kettenmoleküle Thermoplaste
- schwach vernetzte Kettenmoleküle Elastomere
- stark vernetzte Kettenmoleküle Duroplaste

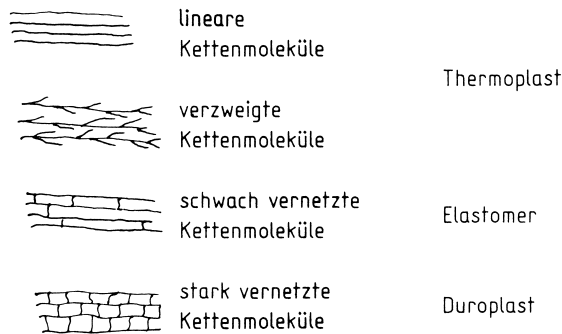


Bild 2.2.1 Schematische Darstellung der Anordnung der Kettenmoleküle in Kunststoffen

2.2.1 Thermoplaste

Die Kunststoffe, deren Makromoleküle *lineare oder verzweigte Ketten* darstellen, nennt man Thermoplaste oder auch Plastomere. Die einzelnen Molekülfäden werden untereinander ausschließlich durch *sekundäre Bindungskräfte* zusammengehalten. Die Höhe der Sekundärkräfte ist unter anderem von der Art und Anzahl der Verzweigungen bzw. Seitenketten abhängig. Besitzen die Moleküle nur geringe Verzweigungen, d. h. kurze und wenige Seitenketten, so können sich die einzelnen Molekülfäden dicht nebeneinander legen. Diesen Vorgang der Entstehung des dichten Packungszustands der Moleküle bezeichnet man auch als Kristallisation.

Allerdings kann es bei Kunststoffen aufgrund der langen Molekülketten, die sich bei ihrer Synthese auch um- und ineinander verschlingen, nicht zu einer vollständigen Kristallisation kommen. Daher spricht man auch von *teilkristallinen Thermoplasten*. Die teilkristallinen Thermoplaste sind im nicht eingefärbten Zustand nie glasklar, sondern sie sind durch die Lichtstreuung an den Grenzen der Kristallite (kristallinen Bereiche) immer etwas trübe oder milchig.

Kunststoffe, deren monomere Bausteine komplexe chemische Strukturen darstellen (z. B. der Benzolring beim Polystyrol am C-Atom), deren Molekülketten stark verzweigt und deren Seitenketten lang sind, können dagegen aufgrund ihres unregelmäßigen Aufbaus den Zustand einer so dichten Packung wie in Kristalliten nicht einnehmen. Hier sind die Kettenmoleküle wie in einem Knäuel oder einem Wattlebausch in- und umeinander verschlungen. Sie erstarren ebenso wie die anorganischen Gläser *amorph*. Diese Kunststoffe bezeichnet man deshalb auch als amorphe Thermoplaste. Da sie im nicht eingefärbten Zustand immer glasklar sind, werden diese Thermoplaste auch als synthetische oder organische Gläser bezeichnet. In Bild 2.2.2 ist die Anordnung der Makromoleküle für einen teilkristallinen und einen amorphen Thermoplasten schematisch dargestellt.

Seitenketten
bedingen Ketten-
anordnungen

Teilkristallinität

amorphe
Thermoplaste