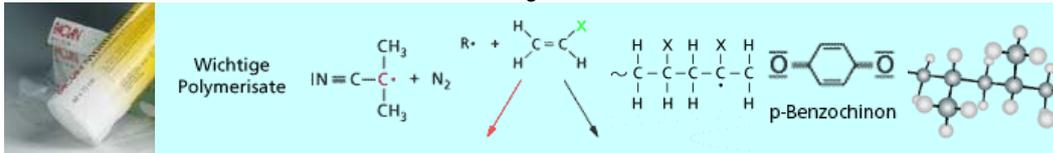


# Polymerisation



Die Polymerisation ist eine der Synthesarten zur Herstellung von Polymeren. Damit sie möglich ist, müssen die Monomere mindestens eine Doppelbindung enthalten, über die sie in einer Kettenreaktion verknüpft werden. Dabei finden keinerlei Umlagerungen statt wie bei der Polyaddition, und es werden auch keine Nebenprodukte abgespalten wie bei der Polykondensation. Durch Polymerisation werden viele wichtige Kunststoffe des täglichen Gebrauchs hergestellt (Bild 2). Um eine Polymerisation einzuleiten, muss zunächst die Doppelbindung des Monomers aktiviert werden. Dies kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden: Einerseits, indem Energie zugeführt wird, z. B. als Wärme, durch Bestrahlung oder durch Ultraschall, andererseits auf chemischem Wege durch Verwendung stofflicher Initiatoren, die sich leicht zu Radikalen oder reaktiven Ionen anregen lassen und so die Polymerisation starten. Von technischem Interesse sind insbesondere radikalbildende Initiatoren, wie Peroxide und Azoverbindungen sowie ionische Initiatoren. Zunehmend gewinnen Metall-Komplex-Initiatoren an Bedeutung, da sich mit ihrer Hilfe eine ausreichende Kontrolle der stereochemischen Abläufe und somit der Eigenschaften des Reaktionsproduktes erreichen lässt.

Je nach Art des verwendeten Initiators verläuft die Polymerisation nach verschiedenen Mechanismen. Man unterscheidet die radikalische, die kationische und die anionische Polymerisation, außerdem die stereoselektive Polymerisation, die mithilfe von Metall-Komplex-Katalysatoren durchgeführt wird.

## Radikalische Polymerisation

Radikale, also reaktive Teilchen, die ein freies, ungepaartes Elektron besitzen, sind die Initiatoren der radikalischen Polymerisationen. Solche Radikale werden in der Regel in einem der eigentlichen Reaktion vorgelagerten Schritt durch Einwirkung von sichtbarem Licht oder anderer energiereicher Strahlung bzw. Wärme auf leicht spaltbare Peroxide oder Azoverbindungen gewonnen (Bild 3). Im Labor greift man dafür häufig auf Dibenzoylperoxid (DBO) oder Azobisisobutyronitril (AIBN) zurück, während im industriellen Maßstab aus wirtschaftlichen Gründen preiswertere Verbindungen verwendet werden.

Das gebildete Startradikal löst in der Folge eine Kettenreaktion aus, die im Wesentlichen durch drei Schritte gekennzeichnet ist:

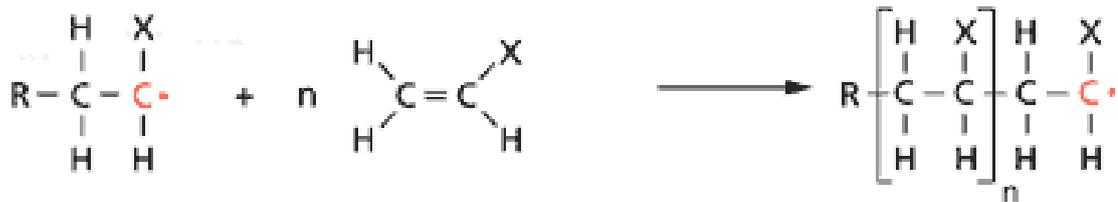
1. In der Startreaktion, die auch als Kettenstart bezeichnet wird, spaltet das Startradikal die Doppelbindung des Monomers, indem es sich an dieselbe addiert und so ein neues Radikal bildet.

**Startreaktion: Bildung von Monomerradikalen**



2. Dieses neue Radikal reagiert in der nun folgenden Kettenwachstumsreaktion mit einem weiteren Monomer, wobei wieder ein Radikal entsteht, das erneut mit einem Monomer reagiert.

**Kettenwachstum (n mal)**



3. Der Wachstumsprozess endet erst, wenn in der Abbruchreaktion zwei Radikale ihre Radikaleigenschaft verlieren und somit keine weitere Wachstumsreaktion mehr möglich ist. Dies kann auf zwei Arten geschehen: Zum einen können die beiden Radikale miteinander kombinieren, was als Rekombination bezeichnet wird, zum anderen kann eine Disproportionierung, stattfinden, bei der durch Übergang eines Wasserstoffatoms aus den beiden Radikalen ein Alkan und ein Alken gebildet werden.

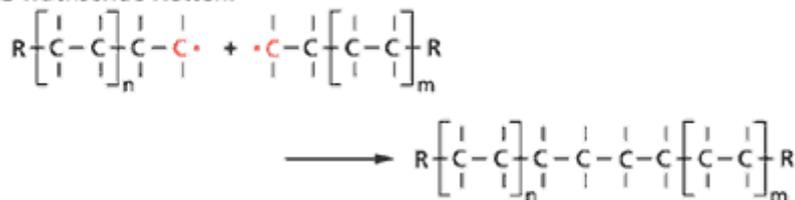
a) Rekombination von Radikalen



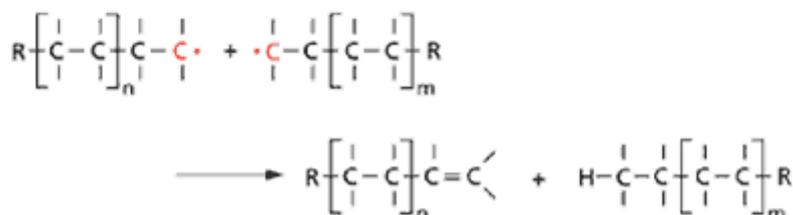
Startradikal mit wachsender Kette:



2 wachsende Ketten:



b) Disproportionierung



Da die Abbruchreaktionen rein statistisch erfolgen, bilden sich Makromoleküle unterschiedlicher Kettenlänge.

Als Monomere, die üblicherweise in Polymerisationsreaktionen eingesetzt werden, dienen Ethen oder Derivate des Ethens, bei dem ein oder mehrere Wasserstoffatome durch andere Atome oder Atomgruppen ersetzt sind. Je nach eingesetztem Monomer erhält man unterschiedliche Kunststoffe, wobei der prinzipielle Ablauf der Kettenreaktion gleich bleibt. Man kann auch verschiedene Monomere einsetzen, woraus dann Mischpolymere bzw. Copolymere gebildet werden.

Meistens ist bei den Monomeren nur ein einziges Wasserstoffatom durch ein anderes Atom oder durch eine Atomgruppe ersetzt, sie sind daher an den Doppelbindungen unsymmetrisch substituiert. Im Prinzip können daher bei der Reaktion mit einem Radikal zwei unterschiedliche Produkte entstehen, je nachdem, ob das Radikal eine Bindung zum substituierten oder zum nicht substituierten Kohlenstoffatom ausbildet. Tatsächlich ist aber das Additionsprodukt, bei dem das substituierte Kohlenstoffatom das freie Elektron trägt, stabiler, weshalb die Addition normalerweise in der sogenannten Kopf-Schwanz-Stellung erfolgt (Bild 4). In der Polymerkette wechseln sich daher substituierte und unsubstituierte Kohlenstoffatome ab.

#### Reaktionsbedingungen und Polymereigenschaften

Der Verlauf der Polymerisation wird in hohem Maße durch den Einsatz spezieller Katalysatoren beeinflusst, aber auch die Temperatur der exothermen Reaktion steuert die Eigenschaften des Polymers.

#### Kettenübertragung

Insbesondere bei höheren Reaktionstemperaturen sind Kettenübertragungsreaktionen häufig. Das wachsende Radikal spaltet mitten aus einer anderen Kette ein Wasserstoffatom ab, sodass ein neues Radikal entsteht, das die Kettenreaktion fortführen kann. Im Unterschied zu den beim Kettenstart und beim Kettenwachstum gebildeten Radikalen befindet sich das reaktive Kohlenstoffatom mit dem ungepaarten Elektron hier nicht am Ende der Kette (Bild 5). Reagiert dieses Radikal mit Monomeren, entstehen unerwünschte Verzweigungen im Polymer.

#### Regelung der Kettenlänge bei der Polymerisation

Die Kettenlänge der gebildeten Monomere kann durch die Menge der verwendeten Startersubstanz ebenso wie durch die Temperatur beeinflusst werden. Je höher die Temperatur bzw. je mehr Startradikale zur Verfügung stehen, um so schneller verläuft die Reaktion, und entsprechend kürzer werden die gebildeten Ketten. Werden die Ketten zu lang, besteht die Gefahr eines explosiven Verlaufs der Polymerisation, da mit wachsender Kettenlänge die Viskosität des Polymerisates zunimmt und daher die Reaktionswärme nur schlecht abgeführt werden kann. Durch Zusatz geeigneter Inhibitoren oder Regler kann die Kettenlänge ebenfalls

gezielt beeinflusst werden. Regler sind Stoffe, die als Ladungsüberträger wirken. So können Thiole ein Wasserstoffatom auf eine wachsende Kette übertragen und das Wachstum stoppen. Dabei entsteht ein neues Radikal, das wiederum eine Kette starten kann (Bild 6).

Inhibitoren sind Stoffe wie Amine, Phenole und Chinone, die relativ stabile und damit reaktionsträge Radikale bilden, die die wachsende Kette nicht fortpflanzen können. Generell eignen sich ungesättigte Substanzen mit hoher Elektronendichte (insbesondere aromatische Systeme) als Inhibitoren, da der Elektronenmangel eines entstehenden Radikals durch mesomere oder induktive Effekte stabilisiert wird. Durch Disproportionierung oder Rekombination werden die Inhibitoren weiter stabilisiert.

Ein Beispiel für einen Inhibitor ist p-Benzochinon (1,4-Dihydroxybenzen).

Reagiert die wachsende Kette an Stelle eines Monomers mit einem p-Benzochinonmolekül, können drei unterschiedliche Radikale gebildet werden. Diese werden als aromatische Radikale alle durch Mesomerie stabilisiert und sind daher reaktionsträge (Bild 7).

#### Polymerisation mit Metallkomplex-Katalysatoren

Durch spezielle Katalysatoren lässt sich insbesondere die **Taktizität** steuern, die wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften eines Polymers hat. Sie beschreibt die Anordnung der Substituenten relativ zur Polymerkette. In der Kette sind alle Kohlenstoffatome  $sp^3$ -hybridisiert, was bedeutet, dass die vier Atome, an die sie jeweils gebunden sind, tetraedrisch angeordnet sind. Für die Anordnung der Substituenten in der Molekülkette gibt es daher insgesamt drei Möglichkeiten. Von einem isotaktischen Polymer spricht man dann, wenn alle Substituenten in dieselbe Richtung zeigen. Zeigen sie regelmäßig abwechselnd in beide Richtungen, nennt man dies syndiotaktisch. Eine unregelmäßige Anordnung der Substituenten bezeichnet man als ataktisch (Bild 8).

Normalerweise entstehen bei einer Polymerisation ataktische Produkte ohne regelmäßige Anordnung der Substituenten. Die stereospezifische Synthese, bei der syndiotaktische oder isotaktische Polymere gebildet werden, wurde erst durch die Entdeckung spezieller metallorganischer Katalysatoren durch K. W. ZIEGLER und G. NATTA möglich. Vereinfacht gesagt, halten diese Katalysatoren die entstehende Polymerkette und das jeweils neu hinzukommende Monomer so fest, dass es nur auf eine ganz bestimmte Art an die Kette angebaut werden kann, wodurch sich eine regelmäßige Anordnung der Substituenten ergibt.

Das Prinzip wird auch als Koordinationskatalyse bezeichnet. Weitere Einzelheiten dazu findet man im Beitrag "Polyethylen".

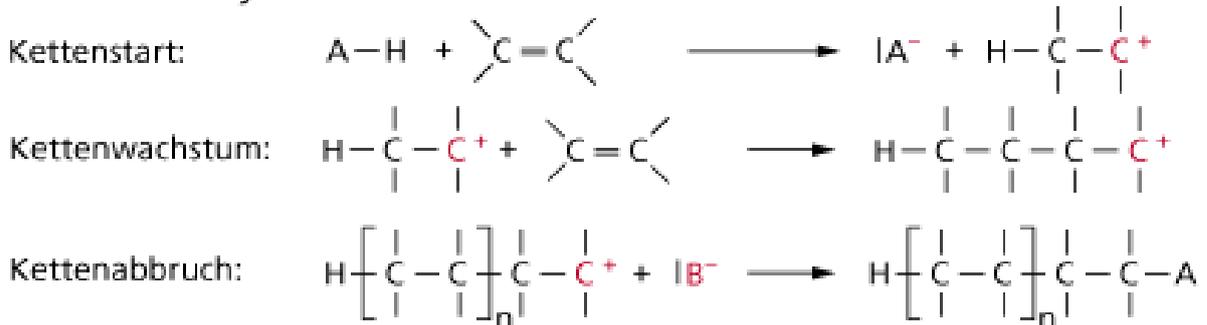
#### Ionische Polymerisation

Eine Polymerisation kann auch durch Ionen initiiert werden. Man unterscheidet zwischen kationischer und anionischer Polymerisation.

Für die kationische Polymerisation werden als Initiatoren starke Brönsted-Säuren

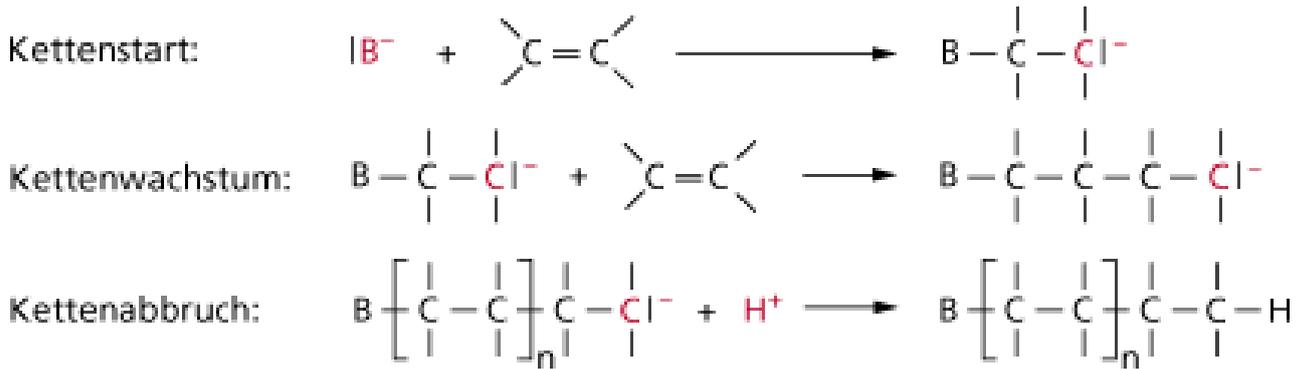
oder Lewis-Säuren wie Bortrifluorid ( $\text{BF}_3$ ) bzw. Aluminiumtrichlorid ( $\text{AlCl}_3$ ) in Verbindung mit Wasser eingesetzt. Bei der Hydrolyse der Lewis-Säuren Bortrifluorid und Aluminiumtrichlorid werden Oxoniumionen,  $\text{H}_3\text{O}^+$ , gebildet. Die Reaktion wird durch die Addition eines Protons an eine Doppelbindung des Monomers gestartet, wobei ein Carbo-Kation entsteht, das mit einem weiteren Alkenmolekül reagiert und so das Kettenwachstum sichert. Durch Abspaltung eines Protons oder durch Anlagerung eines Anions (aus dem Startkatalysator) wird das Kettenwachstum abgebrochen. Man setzt dazu auch gezielt Basen oder geeignete Anionen zu. Ein wichtiges Produkt der kationischen Polymerisation ist Butylkautschuk, ein Copolymer aus 2-Methylpropen und 0,5-5 % Isopren.

#### Kationische Polymerisation:



Die anionische Polymerisation wird durch Addition einer starken Base oder eines reaktionsfähigen Metalls wie Natrium ausgelöst, wobei durch Anlagerung der Base an ein Monomer oder durch Elektronenübertragung ein Carbanion entsteht, welches die Kettenreaktion fortsetzt. Man muss folglich mit extrem reinen Substanzen arbeiten, da schon kleinste Verunreinigungen (z. B. Wasser oder Alkanol) ein Proton freisetzen können, das mit dem Carbanion reagiert und so zum Kettenabbruch führt. Ein Abbruch der Reaktion findet erst statt, wenn Protonenlieferanten wie z. B. Wasser zugegeben werden. In Abwesenheit solcher Stoffe können die reinen, reaktiven Carbanionen, die auch "Lebende Polymere" genannt werden, über lange Zeit hinweg aufgehoben werden. Sie dienen zur Synthese von Block-Copolymeren. Hierbei synthetisiert man zunächst aus einer Sorte von Monomeren ein Stück der Polymerkette, dann baut man aus einer anderen Sorte von Monomeren das nächste Stück an usw. Man erhält also Polymere, deren Ketten aus einzelnen Abschnitten bestehen, die aus verschiedenen Monomeren synthetisiert wurden. Ein Beispiel für solche Copolymere sind die Styrol-Butadien-Kautschuke, aus denen Autoreifen und Schuhsohlen hergestellt werden.

## Anionische Polymerisation:



## [Polykondensation](#)

### [Polyamide](#)

### [Polyvinylchlorid \(PVC\)](#)

### [Styropor \(Polystyren\)](#)

### [Kunststoffe, Kunstfasern und Elastomere](#)

### [Übersicht technisch wichtiger Kunststoffe](#)

## Polykondensation



Die Polykondensationsreaktion ist eine chemische Reaktion organischer Stoffe, bei der aus vielen Molekülen unter Abspaltung kleinerer Moleküle Makromoleküle gebildet werden. Bei den abgespaltenen Molekülen handelt es sich meist um Wassermoleküle. In diesem Fall ist diese Reaktionsart ein Sonderfall der Kondensationsreaktion.

Weil sich Moleküle zusammenlagern lassen und dabei andere Moleküle abgespalten werden, also ein Austausch von Atomgruppen erfolgt, handelt es sich um eine besondere Substitutionsreaktion.

Die Art an der chemischen Reaktion beteiligten Bindungen bleibt erhalten. Liegen bei den Ausgangsstoffen Einfachbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen der Moleküle vor, so weisen auch die Reaktionsprodukte Einfachbindungen in ihren Molekülen auf.

Die Moleküle der Ausgangsstoffe besitzen häufig funktionelle Gruppen oder andere reaktionsfähige Stellen, wodurch die Reaktion ermöglicht wird.

Bei manchen Reaktionsprodukten können sich dann nicht nur linear aufgebaute Makromoleküle, sondern auch räumlich vernetzte Strukturen ausbilden.

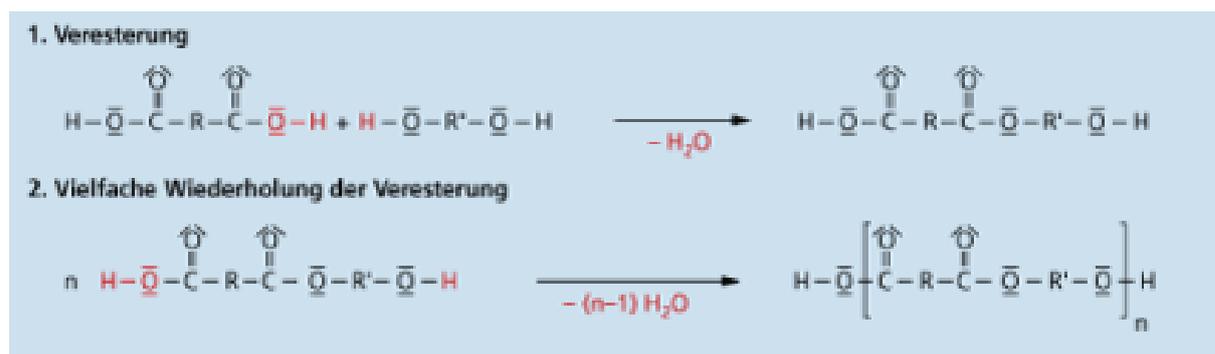
## Polykondensation in der chemischen Industrie

Die Polykondensation ist neben der Polymerisation und der Polyaddition eine Reaktionsart, die bei der Herstellung von Kunststoffen eine bedeutende Rolle spielt.

**So entstehen viele Duroplaste durch Polykondensation. Z.B, Polyester**

Dazu gehören die Phenoplaste.

Auch die thermoplastischen Polyamide (Nylon-, Perlon-Typen) und die linearen und vernetzten Polyester (sh. Abb. unten) entstehen durch die Polykondensation.



## Polykondensation in der Natur

Durch Polykondensationsreaktionen werden auch viele natürliche makromolekulare Stoffe gebildet.

So entstehen Polypeptidketten, indem viele Aminosäuren unter Abspaltung von Wassermolekülen aus Amino- und Carboxylgruppen miteinander reagieren.

Die gebildeten Polypeptidketten bilden durch die Art, Anzahl und Reihenfolge der Aminosäurereste in der Kette die Primärstruktur von Eiweißen.

Die Polysaccharide Stärke und Cellulose werden ebenfalls durch Polykondensation aus vielen Glucosemolekülen gebildet. Bei der Reaktion der Glucose zu den jeweiligen Makromolekülen wird Wasser aus Hydroxylgruppen abgespalten.

Die jeweiligen biochemischen Reaktionen, die zur Bildung von Makromolekülen führen, werden durch Biokatalysatoren (Enzyme) ausgelöst und gesteuert.

# Polyamide



Was sind Polyamide ?

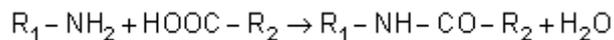
Polyamide (PA) sind makromolekulare Stoffe, die durch Kondensation (Polykondensation) von Diaminen und Dicarbonsäuren entstehen.

Es können aber auch Polyamide entstehen, wenn sich Ringsysteme einer Aminosäure öffnen und miteinander verbunden werden.

Bildung eines Polyamids

Die einzelnen Teile (Monomere) sind im Makromolekül durch sogenannte Amidbindungen miteinander verbunden.

Die Bildung von Polyamiden erfolgt durch Wasserabspaltung aus zwei funktionellen Gruppen. Es handelt sich dabei um eine Aminogruppe ( $-\text{NH}_2$ ) und eine Carboxylgruppe ( $-\text{COOH}$ ).



(R1 und R2 sind die beliebigen organischen Reste der Moleküle).

Haben die jeweiligen Moleküle zwei Aminogruppen (Diamine) beziehungsweise zwei Carboxylgruppen (Dicarbonsäuren), so können sich lange Ketten bilden.

Eigenschaften

Die Polyamide gehören zu den Thermoplasten. Sie sind also unter Wärmeeinwirkung verformbar und schmelzen beim Erhitzen.

Im allgemeinen sind sie farblos oder gelblich, durchsichtig bis undurchsichtig und haben keinen charakteristischen Geruch oder Geschmack.

Sie besitzen eine sehr glatte Oberfläche, trocknen schnell, sind sehr zäh und reißfest und haben eine relativ große Beständigkeit gegenüber Wasser, verdünnten Säuren und organischen Lösungsmitteln.

Wie alle Kunststoffe können sie Wärme nur schlecht leiten und sind elektrische Isolatoren.

Verwendung

Verwendung finden Polyamide als Kunstfasern wie Nylon oder Perlon und zur Herstellung von Gebrauchsgegenständen wie Schutzhelmen, Reißverschlüssen oder Folien, sowie Maschinenteilen.

Nylon, ein Vertreter der Polyamide

Das erste synthetisch hergestellte Polyamid, das Nylon, gewann man aus Hexamethyldiamin und Hexandisäure bei Du Pont in den USA. Es ist der bekannteste Kunststoff dieser Gruppe.

Hexamethyldiamin  $\text{H}_2\text{N} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH}_2$

Hexandisäure (Adipinsäure)  $\text{HOOC} - (\text{CH}_2)_4 - \text{COOH}$

Polyamid (Nylon)  $(- \text{CO} - (\text{CH}_2)_4 - \text{CO} - \text{NH} - (\text{CH}_2)_6 - \text{NH} - )_n$

Das Molekül enthält Amidgruppen (-CO-NH-), durch die die einzelnen Bestandteile zu einem Riesemolekül verknüpft sind.

Aus der Schmelze wird das Polymer zu sehr feinen Fasern verarbeitet.

Die Polyamide werden durch Zahlen gekennzeichnet, wie das Polyamid 6,6 (Nylon), da es aus einer Carbonsäure mit 6 Kohlenstoffatomen und einem Amin mit 6 Kohlenstoffatomen gebildet wird.

Perlon

Formel :  $\text{H} - (\text{NH} - (\text{CH}_2)_5 - \text{CO})_n - \text{OH}$

Dieser Kunststoff ist ein weiteres Beispiel für ein Polyamid, das durch Polykondensation aus einer Aminosäure mit 6 Kohlenstoffatomen entstanden ist. Dieses Polyamid wird als Polyamid 6,0 bezeichnet. Die Benennung Perlon ist ein Warenzeichen. Perlon wurde in Deutschland etwa zeitgleich wie Nylon entwickelt.

Es handelt sich um einen sehr beständigen Stoff, die meisten Chemikalien greifen ihn nicht an, er ist kochfest und mechanisch relativ hoch belastbar. Die Hauptverwendung liegt in der Herstellung von Wasser abweisenden Geweben, z. B. für Rucksäcke und Campingausrüstungen, aber auch Damenstrümpfen.

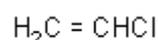
## Polyvinylchlorid (PVC)



PVC - Herstellung

1. Herstellung des Vinylchlorids

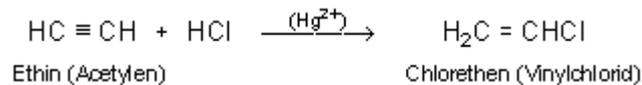
Ausgangsstoff für die Polymerisation zum Polyvinylchlorid (PVC) ist Vinylchlorid (Monochlorethen).



Um es herzustellen, gibt es zwei Möglichkeiten, wobei als Ausgangsstoff einmal Ethin und einmal Ethen dient.

Die erste Möglichkeit ist die Reaktion von Chlorwasserstoff (HCl) mit Ethin (Acetylen). Bei einer Temperatur von 200 °C und unter Druck wird Chlorwasserstoff an die Dreifachbindung des Ethins addiert und bildet Vinylchlorid.

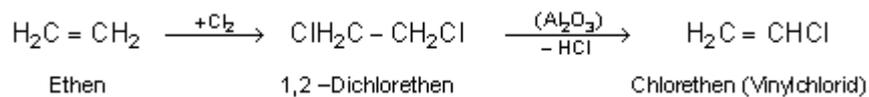
Die Reaktion geschieht in Gegenwart von Quecksilber(II)chlorid als Katalysator.



Dieses Verfahren ist das ältere, es wurde um 1912/1913 von den Chemikern F. KLATTE und E. ZACHARIAS entwickelt. Da jedoch die Herstellung von Ethin teurer ist als die von Ethen, das in großen Mengen durch die Pyrolyse von Erdölfraktionen gewonnen werden kann, wird vorwiegend die folgende Variante durchgeführt:

Bei dieser zweiten Möglichkeit verwendet man Ethen als Ausgangsstoff. In einem ersten Schritt wird Chlor an Ethen addiert.

Aus dem dabei entstandenen 1,2-Dichlorethen wird dann am Katalysator bei 300 - 350 °C Chlorwasserstoff abgespalten und es entsteht Vinylchlorid.



## 2. Polymerisation des Vinylchlorides zu PVC

Die Polymerisation des Vinylchlorides erfolgt nach einem radikalischen Mechanismus (Bild 2).

Bei der radikalischen Polymerisation geschieht die Aktivierung durch Radikalstarter, auch Initiatoren genannt. Dies sind Moleküle, die bereits bei vergleichsweise geringer Energiezufuhr in Radikale zerfallen und eine Kettenreaktion in Gang setzen. Als Initiatoren dienen bei der Herstellung von PVC z. B. Peroxide wie Dibenzoylperoxid (Bild 3). In der industriellen Produktion werden heute andere Peroxide, die bereits bei niedrigen Temperaturen wirksam sind, als Initiatoren eingesetzt, da diese preisgünstiger sind.

## 3. Weiterverarbeitung des PVC

Das entstandene PVC-Pulver beginnt bei ca. 80 °C zu erweichen.

Bei stärkerer Erwärmung von PVC wird Chlorwasserstoff freigesetzt, der den weiteren Zerfall des PVC katalysiert und somit beschleunigt.

Um dies zu verhindern, werden Stabilisatoren zugesetzt, die z. T. giftige Schwermetallverbindungen enthalten.

## Eigenschaften des PVC

Polyvinylchlorid zählt zu den Thermoplasten, es wird also beim Erhitzen weich und plastisch verformbar.

Polyvinylchlorid ist geruchs- und geschmacksfrei, beständig gegen Wasser, gegen viele organische Lösungsmittel und gegen schwache Säuren und Basen.

Polyvinylchlorid besitzt eine schlechte Wärmeleitfähigkeit und eine schlechte elektrische Leitfähigkeit. Bei Wärmeeinwirkung zersetzt es sich langsam. Seine Dichte beträgt 1,38 und die Druckfestigkeit 55 - 90 MPa. Es ist schwer entflammbar.

## Geschichte und Verwendung des PVC

PVC wird seit dem Jahre 1913 technisch hergestellt.

Das Monomer Vinylchlorid war schon seit 1838 bekannt, aber erst 1912 gelang dem deutschen Chemiker FRITZ KLATTE die Polymerisation, bei der er Peroxide als Initiatoren einsetzte. Die großtechnische Anwendung dieses Verfahrens erfolgte allerdings erst kurz vor dem 2. Weltkrieg.

Noch später, erst in den späten 50er Jahren, wurde PVC zu einem der wichtigsten Kunststoffe des täglichen Gebrauchs.

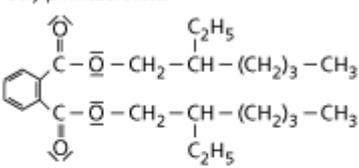
Die Verwendungsmöglichkeiten von PVC sind sehr vielseitig, wobei die Eigenschaften durch zahlreiche Zusatzstoffe variiert werden können.

Beispiel für PVC-Verarbeitungsrezepturen (in Masseteilen)			
	Fensterprofil	Bodenbelag	Kabelisolierung
PVC	80-85	30-40	40-50
Acrylate	5-6	0	0
Stabilisatoren (Ba, Co, Pb-Salze)	2-3 (Ba, Cd)	1,5-2 (Ba, Zn)	1,5-2 (Pb)
Gleitmittel (Wachs)	2-2,5	0	1
Füllstoffe	3-4,5 (Kreide)	40-55 (Kreide)	20-35
Farbstoffe / Pigmente	2-3,5 (TiO <sub>2</sub> )	0	0
Weichmacher (Phthalat)	0	15-25	20-30

Das sogenannte Hart-PVC, das ungefähr zwei Drittel des produzierten PVC darstellt, wird für Haushaltsgegenstände, Verpackungsmaterial, Platten, Rohre, Ventile und Hähne verwendet.

Setzt man dem PVC Weichmacher in Mengen von 15-30 % zu, erhält man Weich-PVC, welches wesentlich elastischer ist.

Als Weichmacher werden z. B. Phthalsäureester oder Adipinsäureester verwendet.

Weichmacher	Verwendung in ...
Aromatische Verbindungen, z. B. Dioctylphthalsäureester 	PVC
Polyalkohole, z. B. - Glycerol oder $\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} - \text{OH} \\   \\ \text{H}_2\text{C} - \text{OH} \\   \\ \text{H}_2\text{C} - \text{OH} \end{array}$ - Polyvinylalkohole $\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{OH} \end{array} \right]_n$	Kunststoffen auf Cellulosebasis und Stärkefolien

Wegen seiner Elastizität kann Weich-PVC zur Herstellung von Schläuchen und Fußbodenbelägen oder Kunstleder verwendet werden.

### Probleme mit PVC

Die Vielfalt der PVC-Produkte führte in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts zu einer starken Verbreitung dieses Kunststoffes.

In dieser Zeit kamen aber auch die ersten Vorbehalte gegen PVC in die Öffentlichkeit.

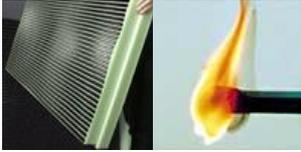
Die Arbeiter, die bei der PVC-Produktion mit dem giftigen Vinylchlorid zu tun hatten, zeigten krankhafte Veränderungen an Haut, Lunge und Gelenken. Die VC-Krankheit (Vinylchlorid-Krankheit) wurde von der Berufsgenossenschaft als Berufskrankheit anerkannt.

Eine Schwierigkeit bei der Entsorgung von Polyvinylchloriden liegt in der Entstehung von Chlorwasserstoffdämpfen und giftigen Dioxinen bei der Verbrennung. Dies erfordert den Einbau teurer Vorrichtungen zur Abgasreinigung in Verbrennungsanlagen für industrielle Abfälle und für Hausmüll.

Ein weiteres Problem ist die mögliche Freisetzung von Weichmachern, die potenziell gesundheitsschädlich sind. So wurde z. B. die Verwendung von PVC für Babyspielzeug in Deutschland verboten, da sich die Weichmacher beim Lutschen am Spielzeug herauslösen können.

Auf Mülldeponien besteht die Gefahr, dass die Schwermetalle, die als Stabilisatoren verwendet werden, und die Weichmacher aus dem PVC in das Grundwasser gelangen können.

# Styropor (Polystyren)



Die Bezeichnung Styropor ist das Warenzeichen (Verkaufsname) für das durch ein Treibmittel aufgeschäumte Polystyren (früher Polystyrol).

Es hat ein sehr geringes Gewicht und wirkt isolierend.

Im Bauwesen eignet es sich in Form von Dämmplatten gut als isolierende Schicht, da es sowohl Wärme als auch Lärm schlecht weiterleitet.

Weiterhin wird es als Verpackungsmaterial und auch in Schwimmwestenfüllungen verwendet.

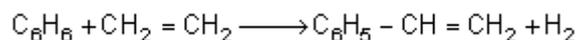
Styropor erhält man also aus Polystyren, das wiederum aus Styren (früher Styrol) hergestellt wird.

## Styren

Styren besitzt die Summenformel  $C_6H_5 - CH = CH_2$ . Es ist eine aromatische Verbindung, die auf das Ringsystem des Benzens ( $C_6H_6$ ) aufbaut.

Es ist eine farblose, stark lichtbrechende Flüssigkeit, die charakteristisch riecht, giftig ist und die Augen und Schleimhäute reizt. In Wasser löst sich Styren kaum.

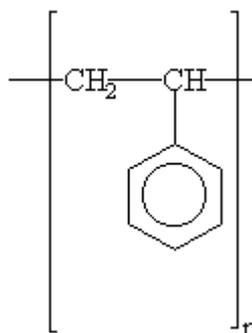
Hergestellt wird es aus Benzen und Ethen:



Durch Polymerisation gewinnt man aus dem Styren das Polystyren (Polystyrol).

## Polystyren

Die Summenformel von Polystyren lautet:  $-(C_6H_5)CH-CH_2-$ <sub>n</sub>



Polystyren (PS) ist ein thermoplastischer Kunststoff, der bei normalen Temperaturen fest ist, aber bei Wärmezufuhr plastisch verformbar wird. Das aus

dem Styren entstehende Produkt ist spröde und schlagempfindlich, farblos, durchsichtig, kleb- und polierbar. Polystyren brennt mit süßlichem Geruch und stark rußender Flamme.

Man verarbeitet es zu Verpackungsmaterialien, Trinkbechern, Haushaltsartikeln und auch zu Schaumstoffen.

Das bekannteste geschäumte Polystyren ist **Styropor** (auch Schaum-Polystyren). Man gibt bei der Polymerisation ein Treibmittel, z. B. Pentan, dazu. Dieses wird in die Polymerisat-Kügelchen eingeschlossen. Wenn die Kügelchen dann über den Siedepunkt des Treibmittels erwärmt werden, verdampft dieses und bläht sie auf. Styropor wird als Verpackungsmittel oder auch zur Wärme- und Schallisolation genutzt, da es ein schlechter Wärmeleiter ist.

## Kunststoffe, Kunstfasern und Elastomere



Zu den Kunststoffen gehören Plaste (Plastik), Fasern, Elastomere, synthetische Lacke und Klebstoffe. Chemisch gesehen handelt es sich bei den Kunststoffen um hochpolymere organische Verbindungen.

Die bekanntesten Kunststoffe sind die unterschiedlichen Plastsorten, die umgangssprachlich auch als Plastik oder Plaste bezeichnet werden.

### Plaste

Das Spektrum der Plastsorten ist sehr umfangreich, wobei die Vielfalt durch die Copolymerisation verschiedener Monomere zur Erzielung gewünschter Eigenschaften noch erweitert wird.

Man unterscheidet:

- Standardkunststoffe (z. B. Polyethylen, Polyvinylchlorid, Polystyren),
- Technische Kunststoffe mit besonderen Eigenschaften und vielseitigem Einsatz (z. B. Polyurethane, Silikone) und
- Hochleistungskunststoffe mit hervorragenden Eigenschaften.

Beispiele für Hochleistungskunststoffe sind:

1. Der Fluorplast PTFE wird nicht nur zur Antihafbeschichtung von Bratpfannen genutzt, er ist thermisch beständig bis 260 °C, er ist auch gegen fast alle Chemikalien beständig (Ausnahme: elementares Fluor und geschmolzene Alkalimetalle).
2. Nicht nur Metalle leiten den Strom, es gibt auch elektrisch leitende Polymere

wie das Schwefel enthaltende Polypyrrrol.

3. Das aromatische Polyamid Polyphenylenterephthalamid mit sehr hoher Festigkeit wird für kugelsichere Westen verwendet, es ist leichter und fester als Stahl.

Nach dem Verhalten beim Erwärmen unterscheidet man zwei große Gruppen - Thermoplaste und Duroplaste.

Thermoplaste

Die Thermoplaste erweichen beim Erwärmen und gehen in einen plastischen Zustand über, in dem sie sich leicht verformen lassen. Die Ursache für das Erweichen und die plastische Verformbarkeit liegt in Struktur der Makromoleküle. Die kettenförmigen Makromoleküle, die das Polymer aufbauen, sind linear angeordnet und nur wenig verzweigt (Bild 3).

Der Zusammenhalt erfolgt vor allem über schwache zwischenmolekulare Kräfte. Bei Wärmeeinwirkung werden diese überwunden und die Moleküle können gestreckt werden. Dabei nimmt die Festigkeit ab und eine Verformung wird möglich. Beim Abkühlen behalten sie die angenommene Form, die zwischenmolekularen Kräfte wirken wieder.

Typische Thermoplaste sind Polyethylen, Polyvinylchlorid oder Polystyren.

Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)

Der Kunststoff Polyethen wird im Haushalt recht häufig verwendet. So sind beispielsweise Eimer, Trinkbecher und Flaschen aus diesem Stoff gefertigt.

Polyethylenfolie wird zum Verpacken von Lebensmitteln genutzt.

Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten beruhen auf den Eigenschaften des Polyethylens.

Es ist geschmacksfrei und geruchlos und fasst sich wachsartig an. Der Stoff gilt als physiologisch unbedenklich.

Daher kann er für die Herstellung von Geschirr eingesetzt werden. Außerdem ist Polyethylen gegen Säuren, Laugen und Salzlösungen beständig und wird auch durch Fette und Öle nicht angegriffen.

Der elektrische Strom wird nicht geleitet.

Polyethylen ist jedoch brennbar und brennt mit leuchtender Flamme. Da es bei relativ niedrigen Temperaturen schmilzt, fallen brennende Tropfen herab (Bild 4).

Man unterscheidet drei Sorten nach den Bedingungen ihrer Herstellung, die zu unterschiedliche Strukturen der Polymerketten führen. Daraus ergeben sich auch unterschiedliche Eigenschaften (Bild 5).

Folien bestehen meist aus dem weicheren Hochdruckpolyethylen, Geschirr dagegen aus dem härteren Niederdruckpolyethylen mit einen Schmelzbereich von 125 bis 130 °C.

Polypropylen hat günstigere Eigenschaften als Polyethylen, es ist steifer und hat einen höheren Schmelzbereich von etwa 165 °C. Damit hat es einen größeren Einsatzbereich.

#### Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid ist ein halogenhaltiger Plast.

Es wird zwischen Hart- und Weich-PVC unterschieden.

Zur Erzielung günstiger Gebrauchseigenschaften muss man PVC im Gegensatz zu anderen Polymeren viele Additive beimischen, z. B. Stabilisatoren, Gleitmittel, Weichmacher und andere. Dann sind die Verwendungsmöglichkeiten von PVC allerdings sehr vielseitig, wobei die gewünschten Eigenschaften durch zahlreiche Zusatzstoffe variiert werden können.

Beispiel für PVC-Verarbeitungsrezepturen (in Masseteilen)			
	Fensterprofil	Bodenbelag	Kabelisolierung
PVC	80-85	30-40	40-50
Acrylate	5-6	0	0
Stabilisatoren (Ba, Co, Pb-Salze)	2-3 (Ba, Cd)	1,5-2 (Ba, Zn)	1,5-2 (Pb)
Gleitmittel (Wachs)	2-2,5	0	1
Füllstoffe	3-4,5 (Kreide)	40-55 (Kreide)	20-35
Farbstoffe / Pigmente	2-3,5 (TiO <sub>2</sub> )	0	0
Weichmacher (Phthalat)	0	15-25	20-30

Das sogenannte Hart-PVC, das ungefähr zwei Drittel des produzierten PVC darstellt, wird für Haushaltsgegenstände, Verpackungsmaterial, Platten, Rohre, Ventile und Hähne verwendet.

Setzt man dem PVC Weichmacher in Mengen von 15-30 % zu, erhält man Weich-PVC, welches wesentlich elastischer ist.

Als Weichmacher werden z. B. Phthalsäureester oder Adipinsäureester verwendet.

Bei der Herstellung von Weich-PVC werden Weichmacher hinzugefügt, die die zwischenmolekularen Kräfte herabsetzen, sodass der Kunststoff weich und schmiegsam wird.

PVC ist schwer entflammbar. Gegenüber konzentrierten Säuren, Basen, Benzin und Mineralölen zeigt sich der Stoff recht beständig.

#### Duroplaste (Duromere)

Die Makromoleküle der Duromere sind in alle Richtungen räumlich verknüpft und engmaschig miteinander vernetzt, sodass beim Erwärmen die Vernetzung nicht entwirrt, sondern nur zerstört werden kann (Bild 6). Der Duroplast zersetzt sich. Deshalb sind Duroplaste auch nicht durch Wärme verformbar.

Phenoplaste und Aminoplaste sind Duroplaste. Sie sind hart und spröde und zersetzen sich bei Erwärmung. Verwendung finden sie z. B. im Möbelbau und zur Herstellung von Steckdosen, Haushaltsgeräten und bruchfestem Geschirr. Die Karosserie des Pkw besteht ebenfalls aus mit Gewebe verstärktem Phenoplast.

### Elastomere

Die Makromoleküle der Elastomere sind weitmaschig vernetzt (Bild 7). Im Normalzustand (ungedehnt) nehmen die Makromoleküle eine Knäuelgestalt an. Durch Krafteinwirkung werden sie gestreckt. Bei Raumtemperatur können sie mindestens auf das Zweifache ihrer Länge gedehnt werden. Nach Aufhebung der Krafteinwirkung nehmen sie aufgrund der ursprünglichen Vernetzung wieder ihren ehemaligen Zustand an.

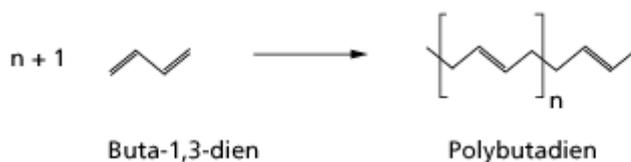
Durch den Vorgang des Vulkanisierens bilden sich zwischen den kettenförmigen Makromolekülen Schwefelbrücken aus, die die Elastizität bedingen (Bild 7).

Da in den Polymerketten noch reaktive Doppelbindungen enthalten sind, werden zum Schutz vor Sauerstoff und UV-Strahlung Ruß, Zinkoxid und andere Füllstoffe als Stabilisatoren eingearbeitet.

Es gibt Natur- und Synthesekautschuk. Die Grundbausteine von Naturkautschuk sind Isoprenmoleküle (2-Methyl-1,3-butadien). Hunderte bis tausende Isoprenmoleküle sind in langen Ketten miteinander verknüpft.



Synthesekautschuk entsteht durch Polymerisation von Buta-1,3-dien zu Polybutadien. Durch Copolymerisation mit anderen Monomeren erhält man aber Produkte mit besseren Gebrauchseigenschaften. Autoreifen stellt man aus dem Copolymer mit 25-30 % Styren (Styren-Butadien-Rubber = SBR) her.



### Fasern

Vollsynthetisch hergestellte Fasern eroberten in den 50er-Jahren des vorigen Jahrhunderts den Bekleidungsmarkt.

Synthesefasern bestehen ebenso wie Plaste aus Makromolekülen. Diese Makromoleküle werden durch Polykondensation und Polymerisation hergestellt. Wichtige Kunststoffsorten, die sich zu Fasern verarbeiten lassen, sind Polyamide (Nylon, Perlon®), Polyester und Polyacrylnitril.

Gardinen werden häufig aus reinen Polyesterfasern hergestellt.  
Polyacrylnitril wird zur Herstellung von Oberbekleidung verwendet, oft im Gemisch mit Wolle.  
Polyamid dient zur Produktion von Seilen ebenso wie zur Herstellung von Strümpfen.

Fasern wie Nylon und Dralon wurden häufig zu 100 % in Textilien verarbeitet. Ihre Eigenschaften "pflegeleicht" und "knitterarm" trugen dazu bei, Naturfasern zu verdrängen. Das hat sich inzwischen geändert, weil die Chemiefasern auch Nachteile gegenüber Naturfasern aufweisen, z. B. laden sie sich leicht elektrostatisch auf und fühlen sich auf der Haut oft unangenehm an. Durch Kombination von Naturfasern und Chemiefasern bei der Stoffproduktion gelingt es, die Vorzüge beider Faserarten zu kombinieren und ihre Nachteile auszugleichen. Die so hergestellten Textilien sind leicht zu pflegen, knittern wenig, sind aber luftdurchlässig aufgrund des Anteils an Naturfasern.

#### Bildung von Fasern

Die Herstellung von Fasern erfolgt beispielsweise bei Polyamiden im sogenannten Schmelzspinnverfahren aus der Schmelze des Polymers.

Aus der Schmelze lassen sich leicht Fäden ziehen. Hierfür wird sie durch Spinn Düsen gedrückt.

Aus den Spinn Düsen treten heiße Flüssigkeitsstrahlen in eine Stickstoff-Atmosphäre. Nach Kühlung entstehen feste Fäden.

Danach werden die Synthesefasern verstreckt. Hierbei wird der hergestellte Kunststoff einem Zug ausgesetzt, sodass sich die Molekülketten in Zugrichtung strecken und dadurch die Reißfestigkeit erhöht wird.

#### Technische und wirtschaftliche Bedeutung der Kunststoffe

Plaste, Elastomere und Fasern sind aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken und weisen nach wie vor hohe Zuwachsraten in der Produktion auf.

Im Jahr 2008 wurden weltweit etwa 260 Mio. Tonnen Kunststoffe hergestellt (PE 33 %, PP 21 %, PVC 17 %, PS + EPS 8 %, PET 7 %, PUR 6 %). In Deutschland lag 2007 die Produktionsmenge an Kunststoffen bei etwa 20 Mio. t.

Die Produktion an Elastomeren betrug im Jahre 2008 weltweit etwa 10 Mio. Tonnen Naturkautschuk und etwa 13,5 Mio. Tonnen Synthetikautschuk. Die Ausweitung der Kautschukplantagen in den tropischen Ländern zulasten der natürlichen Wälder bringt dabei erhebliche ökologische Folgen mit sich.

Die Weltproduktion an Chemiefaser im Jahr 2008 lag bei 42 Mio. t. Die wichtigste Synthesefaser Polyester hat aber mit 26 Mio. t die Baumwollproduktion von 25 Mio. t in der Herstellungsmenge bereits überholt.

In Deutschland wurden im Jahr 2008 etwa 800 000 t Chemiefasern produziert

(davon 185 000 t halbsynthetische auf Cellulosebasis, 240 000 t Polyester sowie je 160 000 t Polyamid und Polyacrylnitril).

### Entsorgung und Verwertung von Kunststoffabfällen

Viele Kunststoffgegenstände haben nur eine Lebensdauer von Monaten bis einigen Jahren. Die Folge ist ein hoher Anfall an Kunststoffabfällen. Während diese Abfälle in vielen Ländern auf Mülldeponien gelangen, gibt es für diese in Deutschland ein Verwertungssystem:

- Werkstoffliche Verwertung ist die Aufbereitung von Altkunststoffen zu neuen Rohstoffen oder direkt zu neuen Formteilen. Der chemische Aufbau der Makromoleküle bleibt dabei erhalten.
- Rohstoffliche Verwertung ist die Umwandlung von Kunststoffen in niedermolekulare Produkte (Monomere oder hochwertige Öle und Flüssiggas), die als Ersatz für fossile Rohstoffe (Erdöl, Kohle oder Erdgas) zum Einsatz kommen.
- Energetische Verwertung ist die Verbrennung, mit dem Ziel der energetischen Nutzung bei gleichzeitiger Zerstörung umweltschädlicher Stoffe und Abscheidung problematischer Substanzen im Verbrennungsrückstand.

Der Verbrauch von Kunststoffartikeln lag im Jahr 2007 in Deutschland bei 10 Mio. Tonnen mit einem Aufkommen an Kunststoffabfällen von 4,9 Mio. Tonnen. Davon wurden 2,1 Mio. t werkstofflich, knapp 0,1 Mio. t rohstofflich und 2,5 Mio. t energetisch verwertet.

### Ökologische Probleme

Die Entsorgung von Kunststoffabfall auf Mülldeponien ist ein sehr ernstzunehmendes Problem. Kunststoffe verrotten sehr langsam und aus Zusatzstoffen wie den Farben, Weichmachern und Stabilisatoren können Schadstoffe in die Umwelt gelangen. Zudem gelten besonders in den Ländern der dritten Welt, wo diese Art von Entsorgung praktiziert wird, nicht die strengen Auflagen wie in Deutschland. Ein zunehmendes Umweltproblem stellen Kunststoffabfälle in den Weltmeeren dar. Die Menge wird auf mehrere 100 Mio. Tonnen geschätzt. Allein im nördlichen Pazifik zirkuliert ein großer Strudel von etwa 1 000 km Durchmesser, entsprechend der Fläche Mitteleuropas, mit 1-2 Plastikteilen pro 100 m<sup>2</sup>. Fische, Schildkröten und Meeresvögel halten umherschwimmende Kunststoffpartikel für Nahrung und verenden elendig daran.

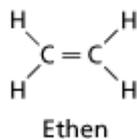
## Übersicht technisch wichtiger Kunststoffe



### 1. Polymerisate

Name	Polyethylen (Polyethen)
------	----------------------------

Monomer



Abkürzung

PE (LDPE und HDPE)

Handelsnamen

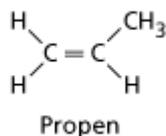
Hostalen, Lupolen, Polythen Firestone Alathon

Eigenschaften,  
Verwendung

Durchscheinend, wachsartig, relativ niedrige Erweichungstemperatur (110 °C). Verwendung für unzerbrechliche Gefäße, Flaschen, Behälter, Eimer, Isoliermaterial, Verpackungsmaterial (Plastikfolien usw.)

Name	Polypropylen (Polypropen)
------	------------------------------

Monomer



Abkürzung

PP

Handelsnamen

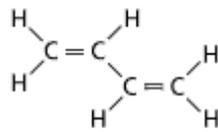
Hostalen PPH, Luparen

Eigenschaften,  
Verwendung

Eigenschaften und Verwendung wie bei Polyethylen, nur die Erweichungstemperatur liegt um ca. 30 °C höher und es ist steifer als Polyethylen

Name	Polybutadien (Kautschuk)
------	-----------------------------

Monomer



1,4-Butadien

Abkürzung

keine

Handelsnamen

Buna

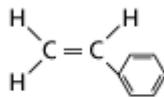
Eigenschaften,  
Verwendung

Gummielastisch nach Vulkanisation.  
Wichtigster Kunstkautschuk, Verwendung u. a. für die  
Herstellung von Autoreifen (BunaS)

Name

Polystyrol (Polystyren)

Monomer



Styrol

Abkürzung

PS

Handelsnamen

Styropor, Styroflex, Vestyron, Luran  
Novodur

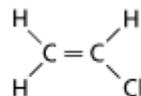
Eigenschaften,  
Verwendung

Glasklar, hart (wenn nicht aufgeschäumt). Verwendung in  
der Elektrotechnik, für optische Linsen, Lacke,  
Gebrauchsgegenstände; aufgeschäumt als  
Verpackungsmaterial (Styropor) und Dämmmaterial für  
Gebäude

Name

Polyvinylchlorid

Monomer



Chlorethen

Abkürzung

PVC

Handelsnamen

Hostalit, Vinidur, Vinylite, Miopo-lam,  
Vestolit

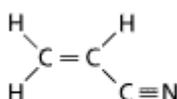
Eigenschaften,  
Verwendung

Weißes Pulver, gepresst ziemlich hart und spröde.  
Verwendung für Platten, Rohre, Fensterrahmen (Hart-  
PVC). Mit Weichmacher für Überzüge auf Gewebe und  
Papier, Fußbodenbeläge, Regenbekleidung,  
Kabelisolierung (Weich-PVC)

Name

Polyacrylnitril

Monomer



Acrylnitril

Abkürzung

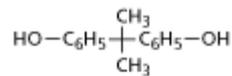
PAN

Handelsnamen	Orlon, Dralon, Acrilan
Eigenschaften, Verwendung	Wollähnliche Kunstfaser von großer Beständigkeit und Festigkeit
Name	Polytetrafluorethen
Monomer	$\begin{array}{c} \text{F} & & \text{F} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{F} & & \text{F} \end{array}$ <p>Tetrafluorethen</p>
Abkürzung	PTFE
Handelsnamen	Teflon, Hostaflon TF, Fluorothene
Eigenschaften, Verwendung	Weißer harte Masse, schwierig zu verarbeiten, da kein Lösungsmittel bekannt. Chemikalienfest, Erweichungspunkt bei 325 °C, keine Warmverformung möglich, Verwendung für Rohre, Dichtungen, Folien, Apparaturen für die chemische Industrie, hitzebeständige Beschichtungen
Name	Polyacrylsäureester
Monomer	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{COOR} \end{array}$ <p>Acrylsäureester</p>
Abkürzung	PMCA
Handelsnamen	Acronal, Stabol, Plexigum
Eigenschaften, Verwendung	Glasklar, gummiähnlich, weich, klebrig Verwendung für Imprägnierungen und Klebstoffe
Name	Polymethacrylsäureester
Monomer	$\begin{array}{c} \text{H} & & \text{CH}_3 \\ & \diagdown & / \\ & \text{C} = \text{C} \\ & / & \diagdown \\ \text{H} & & \text{COOR} \end{array}$ <p>Methacrylsäureester</p>
Abkürzung	PMMA
Handelsnamen	Plexiglas, Lucit, Degalan
Eigenschaften, Verwendung	Glasklar, hart, spröde. Verwendung für Rohre, Platten, Gebrauchsgegenstände, Fenster, Brillengläser; niedrig polymerisiert als Klebstoff

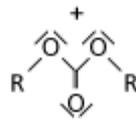
## 2. Polykondensate

Name	Polyamid
Monomer	$\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{NH}_2$ Diamin + $\text{HOOC}-\text{R}-\text{COOH}$ Dicarbonsäure oder $\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{COOH}$ Amino-carbonsäuren
Abkürzung	PA
Handelsnamen	Nylon, Perlon, Grilon, Ultramid, Durethan
Eigenschaften, Verwendung	Fasern von sehr hoher Zugfestigkeit, aber auch als thermoplastischer Kunststoff einsetzbar
Name	Polyester
Monomer	$\text{HOOC}-\text{R}-\text{COOH}$ Dicarbonsäure + $\text{HO}-\text{R}-\text{OH}$ Dialkohol oder $\text{HOOC}-\text{R}-\text{OH}$ Hydroxy-carbonsäure
Abkürzung	PES, PET
Handelsnamen	Alkydharze, Palatal, Leguval, Polyethylenterephthalat (PET), Trevira, Diolen, Dacron, Terylen, Vestan
Eigenschaften, Verwendung	PET wird verwendet zur Herstellung von Plastikflaschen und für relativ feste Kunstfasern (hohe Knitterfestigkeit). Duroplaste (Alkydharze) und Gießharze sind ebenfalls herstellbar. Ungesättigte Polyester sind nachträglich härtbar (PU). Verwendung zur Herstellung großer Platten, z. B. Bootsrümpfe, oft glasfaserverstärkt.
Name	Polycarbonate

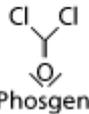
Monomer



Dimethyldi-  
phenylolpropan  
(Dian)



Kohlensäureester  
oder



Phosgen

Abkürzung

PC

Handelsnamen

Makrolon, Lextan, Merlon

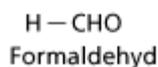
Eigenschaften,  
Verwendung

witterungs- und alterungsbeständig, gute mechanische Eigenschaften, Verwendung als Konstruktions- und Isolierstoff, Maschinenteile - auch Haushaltsartikel, Gehäuse für Radio- und Fernsehgeräte, CDs

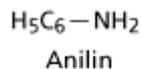
Name

Formaldehydharze

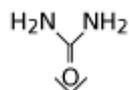
Monomer



+

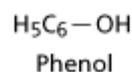


oder



Harnstoff

oder



Abkürzung

MF  
PF

Handelsnamen

mit Anilin:  
Anilinharz, Cibanit;  
mit Harnstoff:  
Carbalit, Iporka;  
mit Phenol: Bakelit, Luphen

Eigenschaften,  
Verwendung

Duroplaste: Verwendung für Pressmassen (z. B. Spanplatten), Iporka wird als Schaumstoff verwendet. Bakelit ist der älteste Kunststoff, z. B. für die Karosserie des Pkw Trabant.

Name	Silicone
Monomer	$\begin{array}{c} R_1 \\   \\ Cl - Si - Cl \\   \\ R_2 \end{array}$ <p>Di- oder Trialkyl- chlorsilane</p> <p>+</p> <p>H<sub>2</sub>O</p>
Abkürzung	
Handelsnamen	
Eigenschaften, Verwendung	gut wärme- und chemikalienbeständig, wasserabstoßend; Verwendung als Schmiermittel, Siliconpasten oder Siliconkautschuk, Dichtmaterial, Imprägnierung von Textilien und Gebäuden

### 3. Polyaddukte

Name	Epoxidharze
Monomer	$Cl - CH_2 - \underset{\text{O}}{\underset{\text{O}}{\text{C}}} - CH_2$ <p>Epichlorhydrin</p> <p>+</p> $HO - C_6H_5 - \underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}} - C_6H_5 - OH$ <p>Dimethyldi- phenylolpropan (Dian)</p>
Abkürzung	EP
Handelsnamen	Araldit, Lekutherm, Epoxin, Duroxin, Epikote
Eigenschaften, Verwendung	Klebstoff mit ausgezeichneten Klebeeigenschaften; besonders auch zum Kleben von Metallen und im Bootsbau (Zweikomponentenkleber)

Name	Polyurethane
Monomer	$HO - R - OH$ <p>Diole</p> <p>+</p> $\begin{array}{c} \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \\ \parallel \quad \quad \quad \parallel \\ \text{C} \quad \quad \quad \text{C} \\ \backslash \quad \quad \quad / \\ \text{N} \quad \quad \quad \text{N} \\ / \quad \quad \quad \backslash \\ \text{C} \quad \quad \quad \text{C} \\ \parallel \quad \quad \quad \parallel \\ \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \end{array}$ <p>Diisocyanate (auch Triole + Triisocyanate)</p>

Abkürzung	PUR
Handelsnamen	Vulkollan, Desmodur, Moltopren
Eigenschaften, Verwendung	Verwendung als Schaumstoff für Polstermöbel, Teppichbeschichtungen, Bauschaum usw., aber auch als Lacke, Klebstoffe und Fasern sowie für Schuhsohlen, Sportgeräte und im Fahrzeugbau