

# Kunststoffe und Polymere

# B 1

## In diesem Kapitel ...

- ▶ Plaste und Elaste
- ▶ Künstlicher und natürlicher Gummi
- ▶ High-Tech-Polymere

---

**E**s gibt unzählige Kunststoffe und polymere Werkstoffe, die uns im täglichen Leben umgeben. In der Zeitung sah ich letztes ein Foto von einer amerikanischen Familie, die alle Gebrauchsgegenstände aus Kunststoff vor ihrem Haus zusammen getragen hatte. Die gesamte Wiese vor dem Haus war mit Gegenständen aller Art bedeckt, vom Spielzeug für die Kleinsten bis zur Küchenmaschine. Es sah sehr bunt und auch etwas beängstigend aus. Kunststoffe sind aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken, da sie häufig verschiedene Eigenschaften miteinander vereinen, die mit anderen Materialien nicht oder nur sehr schwer zu erreichen sind. In diesem Kapitel möchte ich Ihnen einige Methoden zur Herstellung solcher Werkstoffe vorstellen und auf die verschiedenen Anwendungsgebiete eingehen.



**Polymere** sind Makromoleküle (»Riesenmoleküle«), die aus vielen gleichen, niedermolekularen Bausteinen (**Monomeren**) aufgebaut sind. Makromoleküle haben eine hohe Molekülmasse, bestehen also aus sehr vielen Atomen.

## Polymerisation

Bei der Polymerisation reagieren ungesättigte Monomere unter Öffnung von Mehrfachbindungen miteinander, dabei entsteht ein Polymer. Die Namensbildung bei den Polymeren ist recht einfach und einprägsam. Man verwendet den Namen der Monomere und setzt die Vorsilbe »Poly-« davor. So gibt es zum Beispiel Polyethylen, dieses besteht aus Ethylen (Ethen); Polystyren besteht aus vielen Styren-Einheiten; Polyvinylchlorid aus Vinylchlorid-Monomeren. Im Folgenden möchte ich Ihnen einige Polymere, ihre Herstellung und wichtige Anwendungsgebiete vorstellen.

## Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)

Diese Polymere werden aus Ethen beziehungsweise Propen hergestellt (siehe Abbildung 18.1).

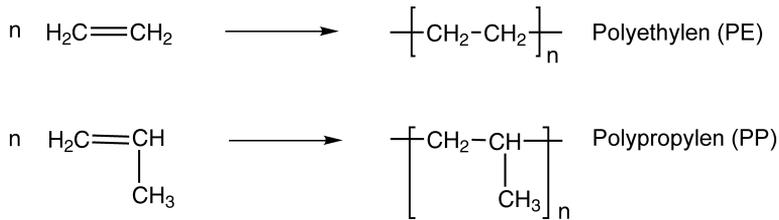


Abbildung 18.1: Herstellung von Polyethylen und Polypropylen

Es gibt zwei grundsätzliche Herstellungsverfahren für Polyethylen, die Hochdruckpolymerisation und die Niederdruckpolymerisation. Bei der Hochdruckpolymerisation wird das Ethen bei etwa 150 MPa und 200 °C radikalisch polymerisiert. Dabei entsteht ein stark verzweigtes Polymer mit geringer Kristallinität und Dichte. Bei der Niederdruckpolymerisation kommen dagegen Katalysatoren zum Einsatz. Diese ermöglichen eine Polymerisation bei Temperaturen zwischen 60 und 150 °C und bei Normaldruck. Das auf diesem Weg erhaltene Polyethylen hat eine lineare Struktur und eine höhere Dichte.

Die Hochdruckpolymerisation von Propen liefert nur niedermolekulare Produkte, die nicht so recht verwendet werden können. Die Polymerisation mit geeigneten Katalysatoren liefert dagegen hochmolekulares Polypropylen mit exzellenten Eigenschaften, sodass man aus diesen Polymeren Rohrleitungen, Behälter und Apparate bauen kann.

### Polystyren oder Polystyrol (PS)

Dieses Polymer wird aus Styren (Styrol) hergestellt. Die Doppelbindung dient zur Ausbildung der Polymerkette, die Phenylreste bilden die Seitenketten des Polymers (siehe Abbildung 18.2).

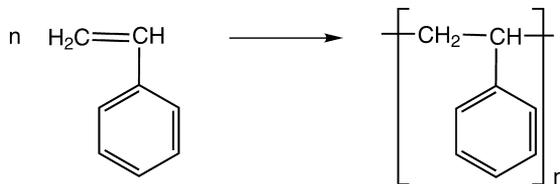


Abbildung 18.2: Herstellung von Polystyren

Das Polymer wird zu Gebrauchsgegenständen verarbeitet und aufgrund seiner isolierenden Eigenschaften auch in der Elektrotechnik für Schalter, Gehäuse, Spulenkörper und anderes verwendet. Sicher jedem ein Begriff ist Schaumpolystyrol (Styropor, Styrodur, Styrofoam). Dieses wird als Verpackungsmaterial (Styroporflocken) und zur Dämmung von Gebäuden eingesetzt. Auch Fahrrad- oder Skihelme enthalten häufig als stoßdämpfende Schicht einen Schaumpolystyrol-Formkörper. Die Schäumung wird durch Verdampfen einer geringen Menge Pentan (etwa 5 %) im Rohprodukt erreicht.

## Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid erhält man durch radikalische Polymerisation von Vinylchlorid (siehe Abbildung 18.3). Reines Polyvinylchlorid wird auch als Hart-PVC bezeichnet und dient zur Herstellung von Folien und Rohren. Durch Zusatz von Weichmachern erhält man Weich-PVC. Dieses wird zu Folien, Kabelisierungen, Fußbodenbelägen und Kunstleder weiterverarbeitet. PVC ist ein Massenkunststoff, der auf Grund seiner einstellbaren Eigenschaften breite Anwendung findet. So reicht das Produktspektrum von Bauprodukten wie Fensterrahmen, Bodenbelägen und Rohren über den Einsatz im Automobilbau bis hin zu Medizinprodukten.



Abbildung 18.3: Herstellung von Polyvinylchlorid

### PVC und Umwelt

PVC wird von einigen Umweltverbänden als »Umweltgift« bezeichnet. Zur Argumentation wird herangezogen, dass man zur Produktion dieses Kunststoffs giftiges Chlor verwendet und der Ausgangsstoff Vinylchlorid für den Menschen krebserzeugend sei. Dem PVC würden teilweise Schwermetalle enthaltende Stabilisatoren und gesundheitsschädliche Weichmacher zugesetzt. Wenn PVC unkontrolliert verbrennt, entstehen polychlorierte Dibenzodioxine und gasförmiger Chlorwasserstoff.

Auch zur Produktion vieler anderer Kunststoffe und sogar zur Herstellung von Medikamenten benötigt man giftige Chemikalien! In der chemischen Industrie werden alle Produktionsprozesse mit giftigen Verbindungen in geschlossenen Anlagen ausgeführt, sodass die Arbeiter mit diesen nicht in Kontakt kommen. Das Argument, dass die Ausgangsstoffe Chlor und Vinylchlorid giftig sind, kann man demnach nicht ernst nehmen. Inzwischen verwendet man für PVC Stabilisatoren, die frei von Schwermetallen sind und gesundheitlich unbedenkliche Weichmacher.

Laut Angaben der Hersteller weist die Produktion von PVC eine bessere Ökobilanz auf als die Produktion vieler anderer polymerer Werkstoffe. Zur Produktion dieses Kunststoffs verbraucht man vergleichsweise wenig Erdöl und Energie. PVC besteht zu 57 % aus Chlor. Dieses wird aus dem praktisch in unbegrenzter Menge verfügbaren Steinsalz hergestellt. Weiterhin wird von den Herstellern die Langlebigkeit von PVC-Produkten betont. Auf Initiative der PVC-Branche werden inzwischen in Deutschland Fensterprofile, Fußbodenbeläge, Rohre und andere Baumaterialien aus PVC dem Recycling zugeführt. Die Hersteller und Verarbeiter haben also auf die Kritik der Umweltverbände reagiert.

## Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Teflon

Polytetrafluorethylen entsteht bei der radikalischen Polymerisation von Tetrafluorethylen (siehe Abbildung 18.4). Dieses Polymer ist chemisch äußerst beständig und wird daher als Dichtmaterial und im Chemieanlagenbau genutzt. Auch im Haushalt wird es vielfach als Antihaftbeschichtung für Bratpfannen und Kochtöpfe eingesetzt. Speziell verarbeitete PTFE-Membranen werden zu atmungsaktiven aber wasser- und winddichten Kleidungsstücken verarbeitet (Handelsname Gore-Tex).

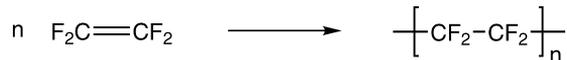


Abbildung 18.4: Herstellung von Polytetrafluorethylen

## Polyvinylacetat (PVAC)

Polyvinylacetat entsteht durch radikalische Polymerisation aus Vinylacetat (siehe Abbildung 18.5). Suspensionen des Polymers in Wasser dienen als Bindemittel, Anstrichstoffe (Latexfarben) und Lacke. Außerdem wird PVAC als Klebstoff verwendet.

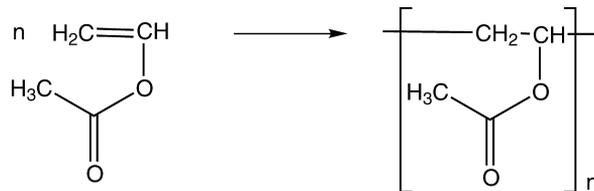


Abbildung 18.5: Herstellung von Polyvinylacetat

## Polyacrylnitril (PAN)

Die radikalische Polymerisation von Acrylnitril liefert Polyacrylnitril (siehe Abbildung 18.6). Aus Lösungen des Polymers in organischen Lösungsmitteln kann man Fasern spinnen. Diese werden zu den verschiedensten Textilien weiter verarbeitet. Bekannte Handelsnamen für Polyacrylnitril-Fasern und -Textilien sind zum Beispiel Dralon und Dolan und Wolpryla.

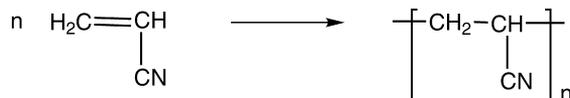


Abbildung 18.6: Herstellung von Polyacrylnitril

## Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) oder Plexiglas

Dieses Polymer erhält man durch radikalische Polymerisation aus Methacrylsäuremethylester (siehe Abbildung 18.7). Das Polymer hat eine bessere optische Durchlässigkeit als Glas und wird vielfach für bruch sichere Verglasungen eingesetzt (»Plexiglas«).

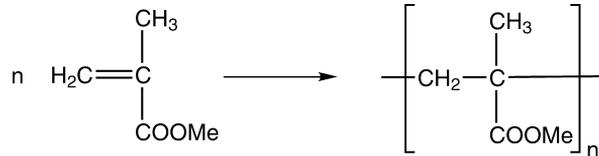


Abbildung 18.7: Herstellung von Polymethacrylsäuremethylester

## Synthetischer und natürlicher Kautschuk

Naturkautschuk wird aus dem Milchsaft (Latex) des Kautschukbaums und einiger anderer tropischer Bäume gewonnen. Dieser Milchsaft besteht aus einer Emulsion von 1,4-Polyisopren in Wasser. Durch Zusatz von Säure scheidet sich der Rohkautschuk als klebrige, weiße Masse ab. Dieser kommt in Form von Kugeln oder »Kautschukfellen« in den Handel. Natürlicher Kautschuk ist aus 1,4-verknüpften Isoprenmolekülen aufgebaut (siehe Abbildung 18.8 oben). Da dieses Polymer in der Natur in einem komplizierten Prozess erzeugt wird, habe ich einen gestrichelten Reaktionspfeil in der ersten Reaktionsgleichung verwendet. Man kann Kautschuk auch künstlich herstellen. Dazu verwendet man Buta-1,3-dien. Die Zahlen 1 und 3

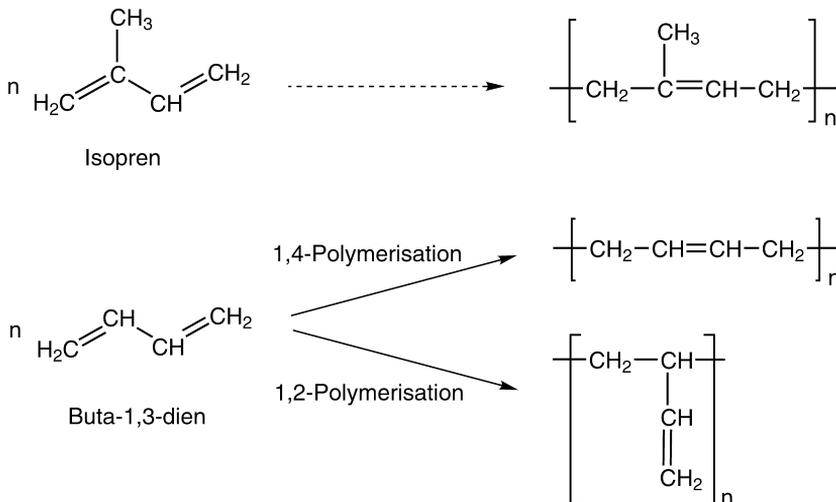


Abbildung 18.8: Naturkautschuk (oben) und Synthetikautschuk (Mitte und unten).

symbolisieren die Stellung der Doppelbindungen in diesem Molekül. Die 1,4-Polymerisation führt zu einem Kautschuk mit ähnlicher Elastizität wie beim Naturkautschuk. Die 1,2-Polymerisation ergibt hingegen ein Produkt mit deutlich schlechterer Elastizität. Man kann die Elastizität des 1,2-Polymers durch Copolymerisation mit Styrol oder Acrylnitril verbessern. Bei einer Copolymerisation werden zwei oder mehrere verschiedene Monomere miteinander polymerisiert.

Naturkautschuk und Synthetikautschuk haben noch nicht die Eigenschaften, die man für Autoreifen, Schuhsohlen oder Gummibälle braucht. Diese Polymere sind klebrig und verformen sich unter einwirkenden Kräften dauerhaft (= *viskoelastisch*). Durch Vulkanisation entsteht der eigentliche Gummi. Dieser geht nach einer Krafteinwirkung wieder in seine ursprüngliche Form zurück, ist also *elastisch*. Außerdem hat vulkanisierter Kautschuk eine höhere Reißfestigkeit und Dehnbarkeit sowie eine bessere Beständigkeit gegenüber Alterungsprozessen. Bei der Vulkanisation erfolgt eine Vernetzung der einzelnen Polymerketten (siehe Abbildung 18.9). Man führt diesen Prozess entweder als Heißvulkanisation mit Schwefel und Vulkanisationsbeschleunigern bei 120 bis 160 °C oder als Kaltvulkanisation mit Dischwefeldichlorid aus.

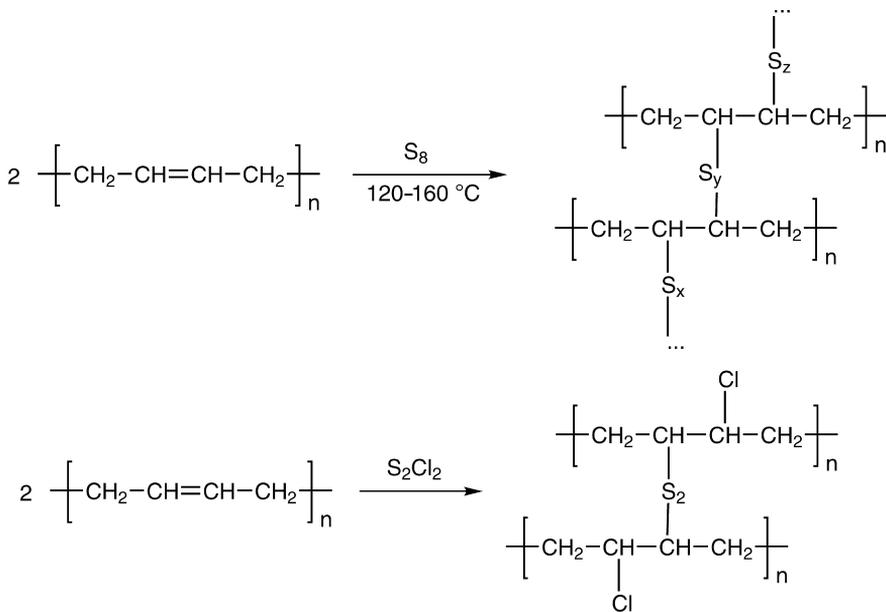


Abbildung 18.9: Heißvulkanisation (oben) und Kaltvulkanisation (unten)

## Polykondensation

Bei der Polykondensation reagieren Monomere unter Abspaltung niedermolekularer Kondensationsprodukte (meist Wasser) zu einem Polykondensat. Es handelt sich um eine Gleichgewichtsreaktion, bei der Makromoleküle mit unterschiedlichen Kettenlängen und niedermolekulare Kondensationsprodukte vorliegen.

## Polyamide

Polyamide entstehen durch Reaktion einer Carbonsäure mit einem Alkylamin. Die Monomere werden dabei über eine Amidbindung (–CO–NH–) miteinander verknüpft. Das ist genau die gleiche Bindung, die zwischen den Aminosäurebausteinen der Peptide besteht. Man bezeichnet diese Art der Verknüpfung daher auch als »Peptidbindung«. Das klassische Verfahren zur Herstellung von Polyamiden geht von Adipinsäure und Hexamethyldiamin aus (siehe Abbildung 18.10). Bei 275 °C entsteht aus diesen beiden Verbindungen unter Wasserabspaltung das Polyamid 66. Die Bezeichnung »66« bedeutet, dass zwei verschiedene Monomere mit jeweils sechs Kohlenstoffatomen eingesetzt wurden.

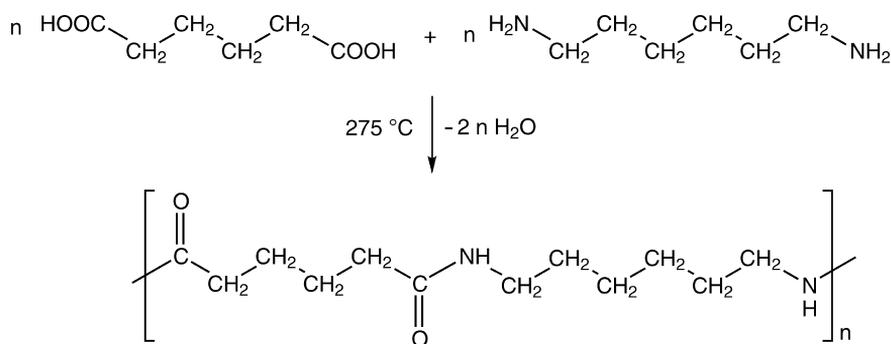


Abbildung 18.10: Herstellung von Polyamid 66

Im Unterschied dazu gibt es auch Polyamid 6. Dieses wird aus nur einem Baustein mit sechs Kohlenstoffatomen erzeugt. Dabei handelt es sich um  $\epsilon$ -Caprolactam ( $\epsilon$  = »epsilon«). Dieses zyklische Molekül wird bei etwa 250 °C einer Ringöffnungspolymerisation unterworfen. Dabei wird zunächst durch Zugabe von etwas Wasser und Essigsäure eine Ringöffnung bei einigen Caprolactam-Molekülen erreicht (siehe Abbildung 18.11, oben). Diese sind dann in der Lage, die Ringöffnungspolymerisation beim gesamten Reaktionsansatz auszulösen. Polyamide werden häufig direkt aus der Schmelze zu Polyamidfasern versponnen. Die geradkettigen Makromoleküle werden durch intermolekulare Wasserstoffbrücken zusammengehalten. Daher haben die gesponnenen Fasern hohe Zug- und Abriebfestigkeit bei einem gleichzeitigen hohen Dehnvermögen. Das macht diese makromolekularen Fasern zum idealen Material zur Herstellung von Strumpfhosen, Fallschirmen und anderen Textilien, die reißfest und dehnbar sein müssen. Bekannte Handelsnamen für Polyamide sind Nylon (Polyamid 66), Perlon und Dederon (Polyamid 6).

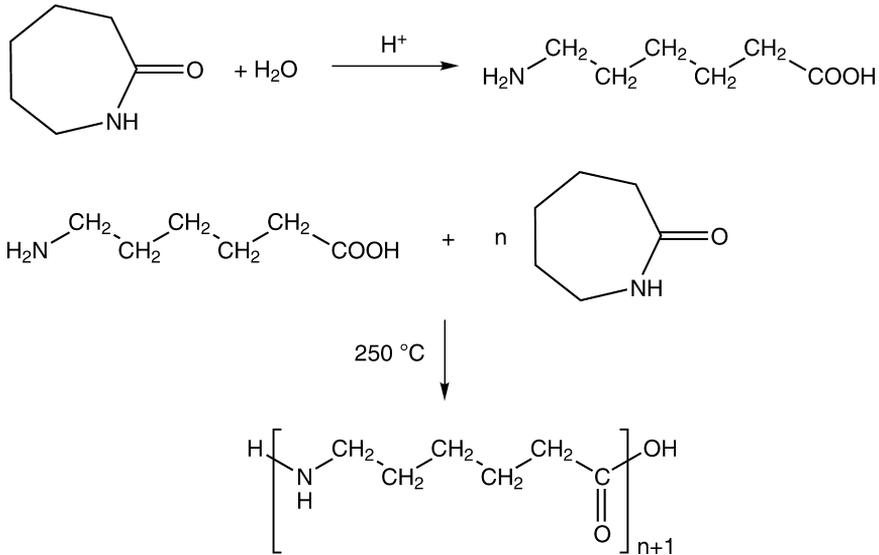


Abbildung 18.11: Herstellung von Polyamid 6

Es gibt auch Polyamide, bei denen die Amidgruppen direkt an zwei aromatische Ringe gebunden sind. Man bezeichnet diese Makromoleküle auch als »Aramide« oder aromatische Polyamide. Der bekannteste Vertreter dieser Verbindungsklasse ist Kevlar (siehe Abbildung 18.12). Aramidfasern haben eine sehr hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit und eine gute Schwingungsdämpfung. Daher wird dieses Material in Faserform zu schusssicheren Westen, Panzerungen für Fahrzeuge und Schnittschutzhandschuhen verarbeitet. Weiterhin werden Gewebe aus Aramidfasern zur Konstruktion von Stadionüberdachungen oder in Faserverbundwerkstoffen im Flugzeugbau eingesetzt.

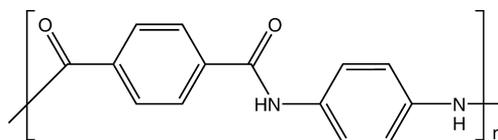


Abbildung 18.12: Strukturformel von Kevlar

## Polyester

Polyester entstehen durch Reaktion von Dicarbonsäuren mit Dialkoholen. Statt der Dicarbonsäure verwendet man manchmal auch Carbonsäureester oder Carbonsäurechloride. In diesen Fällen wird bei der Polykondensation nicht Wasser abgespalten, sondern andere Moleküle (Alkohole oder Chlorwasserstoff). Wie auch immer die Prozessführung im Detail aussieht, als Endprodukt entsteht ein Kunststoff, dessen Monomerbausteine durch Estergruppen (–COO–) zusammen gehalten werden. Der bekannteste Polyester ist Polyethylenterephthalat (PET). Dieses Polykondensat entsteht aus Ethylenglykol und Terephthalsäure (siehe Abbildung 18.13). PET wird zu knitterfesten Textilfasern (Trevira), Folien, Getränkeflaschen und anderen Lebensmittelverpackungen (zum Beispiel Würsthüllen) verarbeitet.

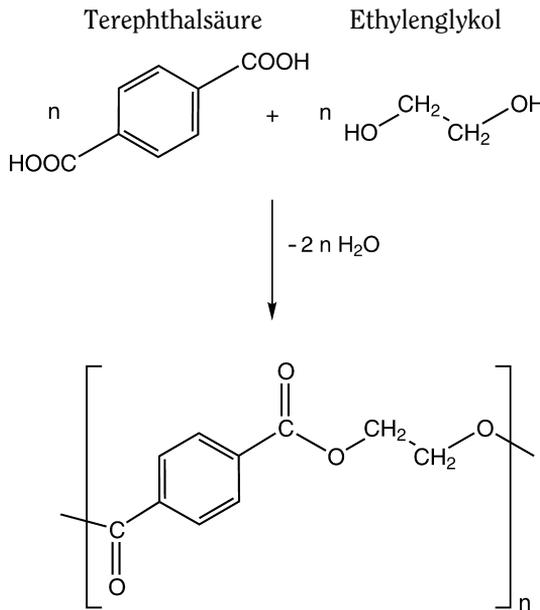


Abbildung 18.13: Herstellung von PET

Aus Glycerin, Phthalsäure und Dicarbonsäuren wie Bernsteinsäure oder Maleinsäure erhält man Alkydharze und Polyesterharze. Diese Polyester stellen vernetzte Polymere dar und werden als Bindemittel in Lacken und als Klebstoffe verwendet.

Polymilchsäure wird aus Milchsäure hergestellt (siehe Abbildung 18.14) und stellt einen biologisch abbaubaren Kunststoff dar. Die natürliche Milchsäure kann auf chemischem Weg aus petrochemischen Ausgangsstoffen (zum Beispiel Erdöl) oder biotechnologisch aus Kohlenhydraten (Mais, Zucker) hergestellt werden. Die Synthese der Polymilchsäure erfolgt durch Verknüpfung der OH-Gruppe mit dem Carbonsäurerest des Monomers.

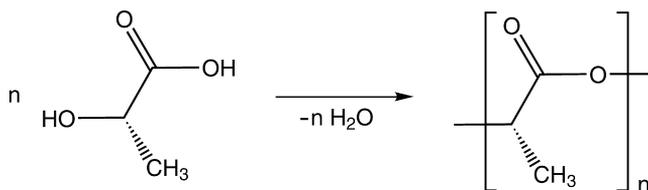


Abbildung 18.14: Herstellung von Polymilchsäure

Polymilchsäure findet vielfältige Verwendung als Verpackungsmaterial für kurzlebige Güter (Folien, Beutel), Mulchfolie im Gartenbau und für Lebensmittelverpackungen (Trinkbecher, Trinkhalme). Die biologische Abbaubarkeit des Polymers ist unabhängig von der Art der Herstellung.

## Phenoplaste (PF)

Phenoplaste ist die Kurzbezeichnung für Phenol-Formaldehyd-Harze. Phenoplaste gehörten zu den ersten industriell hergestellten Kunststoffen und sind seit etwa 1910 als »Bakelit« auf dem Markt. Es gibt zwei Verfahren zur Herstellung dieses Kunststoffes. Man kann die Ausgangsstoffe mit Säuren oder mit Basen als Katalysatoren zur Reaktion bringen. In beiden Fällen reagieren die Wasserstoffatome am Phenol bereitwillig mit dem Formaldehyd unter Ausbildung von Hydroxymethylgruppen ( $-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) (siehe Abbildung 18.15).

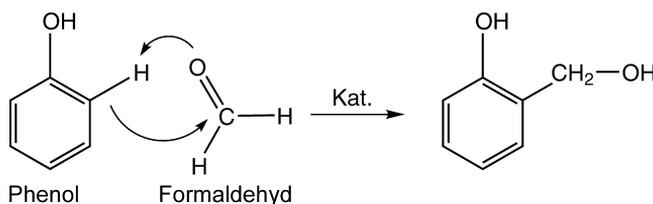


Abbildung 18.15: Säure- beziehungsweise basenkatalysierte Herstellung von Phenoplasten

Die säurekatalysierte Polykondensation führt zunächst zu linearen Polymeren, die keine Hydroxymethylgruppen in der Polymerkette enthalten (siehe Abbildung 18.16, links). Diese löslichen Zwischenprodukte werden als »Novolacke« bezeichnet. Sie können durch Zugabe von Härtungsmitteln, die Formaldehyd freisetzen, vernetzt werden. Dabei entstehen unlösliche Produkte. Die basenkatalysierte Polykondensation wird mit einem Überschuss an Formaldehyd durchgeführt. Dabei entstehen Kondensationsprodukte mit freien Hydroxymethylgruppen (siehe Abbildung 18.16, rechts). Diese so genannten »Resole« werden bei Bedarf durch Erhitzen auf etwa  $150\text{ °C}$  zu gummiartigen und schwer schmelzbaren »Resitolen« oder zu ausgehärteten und nicht schmelzbaren »Resiten« vernetzt.

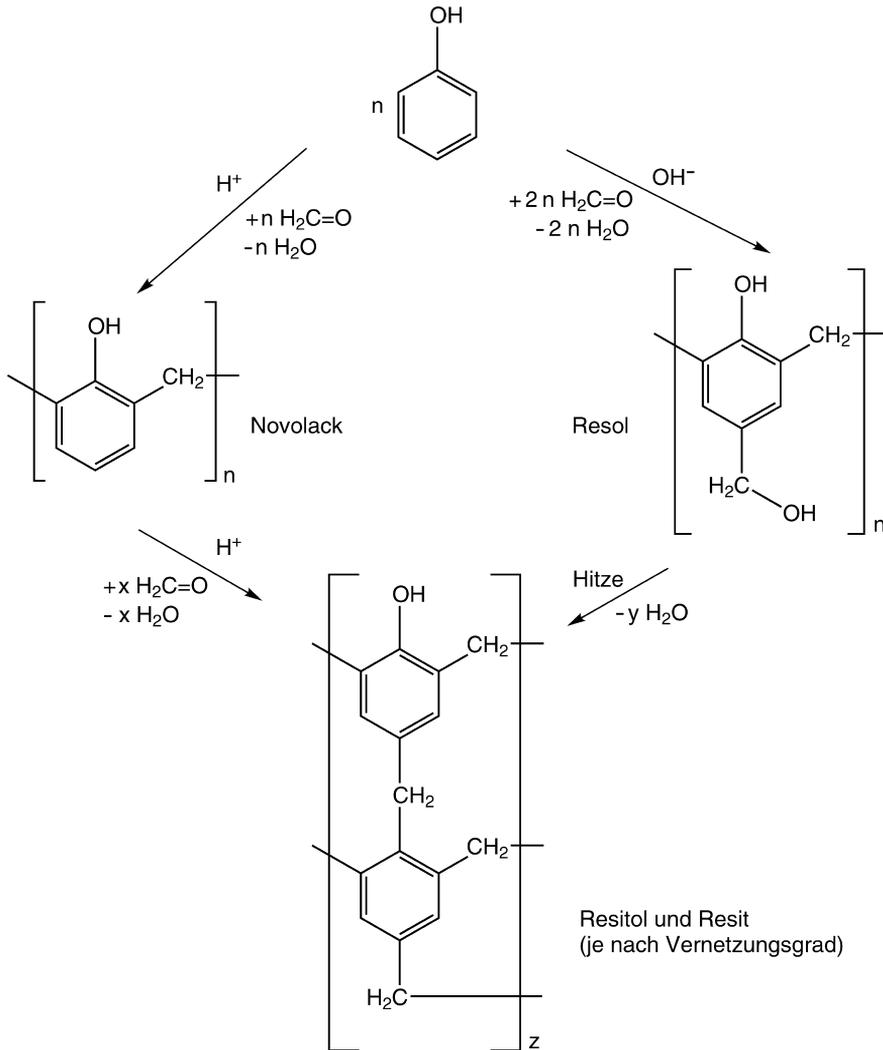


Abbildung 18.16: Herstellung und Vernetzung von Phenoplasten

Da Phenoplaste ganz nach Bedarf vernetzt und dadurch gehärtet werden können, gibt es für diese Kunststoffe vielfältige Einsatzgebiete:

- ✓ Die Kombination von Papier- oder Gewebefasern mit Phenoplasten ergibt Schichtpressstoffe, die zum Beispiel als Leiterplatten oder Gehäuseteile verwendet werden.
- ✓ Phenolharz dient als Bindemittel für Hartfaser- und Spanplatten.
- ✓ Mit Füllstoffen versetzte Phenolharze werden zu Gehäusen für Elektrogeräte, Griffen oder Billardkugeln verarbeitet.

- ✓ Phenoplaste mit zusätzlichen funktionellen Gruppen wie  $-\text{COOH}$  (Carbonsäuren),  $-\text{SO}_3\text{H}$  (Sulfonsäuren) oder  $-\text{NH}_2$  (Aminogruppen) werden als Ionenaustauscher verwendet.

Phenoplaste geben unter bestimmten Bedingungen Phenol und Formaldehyd ab. Daher werden diese Kunststoffe nicht für Lebensmittelverpackungen verwendet.

## Silikone

Die Reaktion von Dichlordialkylsilanen mit Wasser liefert als Zwischenprodukte Silandiole. Diese sind jedoch nicht stabil und bilden sofort unter Wasserabspaltung Silikone (siehe Abbildung 18.17). Im Unterschied zu den bisher behandelten Kunststoffen besitzen die Silikone ein rein anorganisches »Rückgrat« aus Si–O–Si-Einheiten. Dieses sorgt für eine beträchtliche Stabilität dieser Polykondensationsprodukte. So kann man zum Beispiel Silikone im Allgemeinen bis etwa 250 °C erhitzen. Silikone sind außerdem hydrophob, alterungsbeständig, physiologisch unbedenklich, beständig gegenüber Säuren, schwachen Basen und vielen anderen Chemikalien.

Am häufigsten werden Dimethylsilikone produziert. Bei diesen sind die Reste R Methylgruppen (Me). Die Eigenschaften der Silikone sind durch Veränderung der Kettenlänge und des Vernetzungsgrads über einen weiten Bereich einstellbar. Durch Zugabe von  $\text{Me}_3\text{SiCl}$  zur Polykondensation erzeugt man zum Beispiel die Endgruppe  $\text{Me}_3\text{Si-O-}$  und erhält dadurch mehr oder weniger kurzketttige Silikone. Diese werden als Silikonöle für Heißbäder oder als Schmiermittel eingesetzt. Eine Vernetzung der Silikone erreicht man durch Zusatz von  $\text{Me-SiCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$  oder  $\text{H}_2\text{C=CH-SiCl}_3$  bei der Polykondensation. Je nach Menge des hinzugefügten Vernetzungsmittels kann man Silikonfette, Silikonharze oder Silikonkautschuk herstellen. Man verwendet diese Kunststoffe als elektrische Isolatoren, Dichtungsmittel, Schläuche, Kontaktlinsen und Implantate.

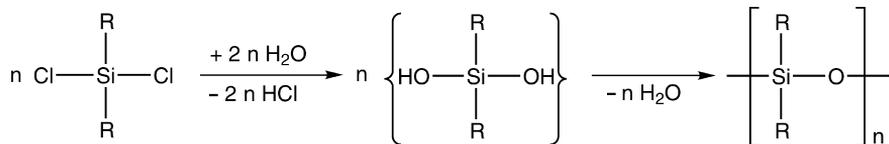


Abbildung 18.17: Herstellung von Silikonen (R = Alkyl, Aryl)

## Polyaddition

Bei einer Polyaddition werden aus (meistens) zwei verschiedenen Monomeren durch Additionsreaktionen Makromoleküle erzeugt.

## Polyurethane (PUR)

Die Polyaddition von Diisocyanaten mit mehrwertigen Alkoholen führt zu Polyurethanen (siehe Abbildung 18.18). Die Diisocyanate werden aus Diaminen und Phosgen ( $\text{OCCl}_2$ ) hergestellt. Phosgen ist hoch giftig; in der chemischen Industrie beherrscht man aber den sicheren Umgang mit dieser Chemikalie. Auch die verwendeten Diisocyanate sind giftig und können Atemwegserkrankungen verursachen. Deshalb dürfen Endprodukte aus Polyurethan keine freien Isocyanate mehr enthalten. Polyurethane werden zu Textilfasern, Lacken, Klebstoffen, und Schuhsohlen verarbeitet, als Gießharze und zum Ummanteln elektronischer Bauelemente verwendet. Ein großer Teil der Polyurethane wird zu Schaumstoffen verarbeitet. So findet man PUR-Schaumstoffe als Polstermaterial in Matratzen, in Autositzen, auf der Unterseite von Teppichen oder in Reinigungsschwämmen. Die stärker vernetzten PUR-Hartschäume dienen als Wärmedämmmaterialien an Gebäuden und in Kühlschränken.

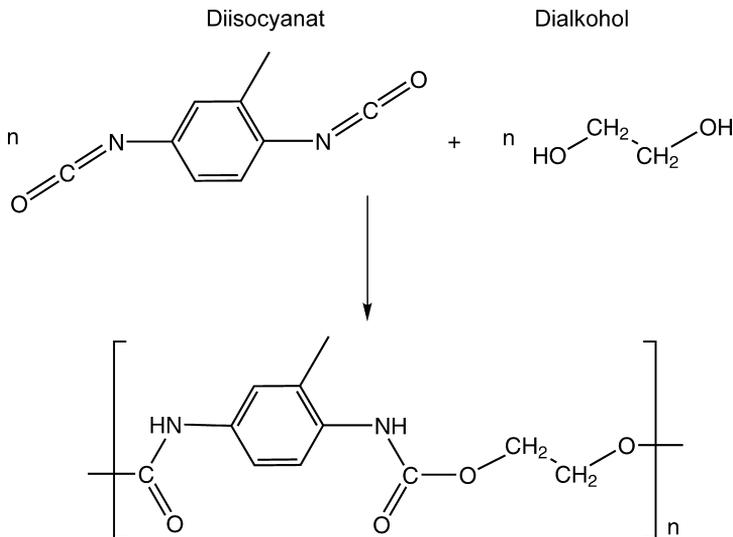


Abbildung 18.18: Beispiel für die Herstellung von Polyurethanen

## Epoxidharze

Epoxidharze werden aus zweiwertigen Phenolen und Chlormethyloxiran hergestellt. Als zweiwertiges Phenol wird häufig Bis-2,2-(4-hydroxyphenyl)propan (»Bisphenol A«) verwendet (siehe Abbildung 18.19). Chlormethyloxiran (Trivialname »Epichlorhydrin«) enthält einen reaktiven Dreiring (»Oxiran«) und ein Chloratom. Damit das Chloratom ebenfalls als reaktive Endgruppe wirkt, führt man die Polykondensation in Gegenwart von Alkalimetallhydroxiden aus. Epoxidharze werden mit Diaminen, Diolen oder Dicarbonsäureanhydriden vernetzt. Dabei reagieren die freien OH-Gruppen und noch vorhandene endständige Epoxidringe mit dem Vernetzungsmittel. Das Epoxidharz härtet dabei aus. Ausgehärtete Epoxidharze sind ungiftig.



Das nicht ausgehärtete Epoxidharz, zum Beispiel bei Zweikomponentenkleber, enthält giftige Bestandteile. Daher sollten Sie den Hautkontakt beim Arbeiten mit solchen Klebstoffen vermeiden!

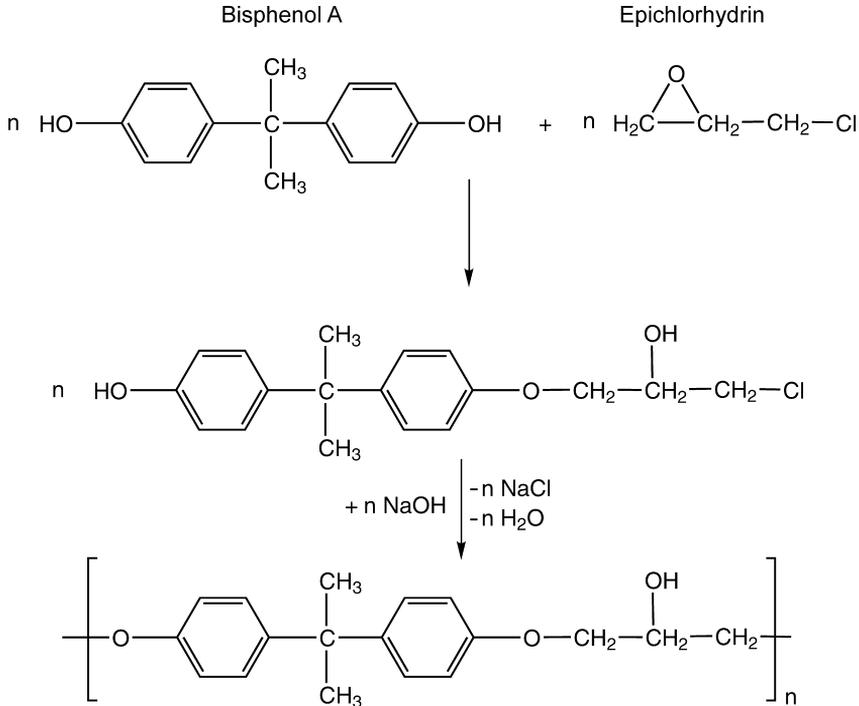


Abbildung 18.19: Beispiel für die Herstellung von Epoxidharzen

Epoxidharze finden umfangreiche Verwendung als Klebstoffe, Bindemittel in Faserverbundwerkstoffen, Korrosionsschutzanstrichen und Vergussmaterial für elektrische Bauteile.

## Eigenschaften von Kunststoffen

Kunststoffe besitzen im Vergleich zu anderen Werkstoffen (Metall, Glas, Beton...) verschiedene herausragende Eigenschaften. Das hat dazu geführt, dass Kunststoffe in vielen Anwendungsgebieten bevorzugt eingesetzt werden. Besondere Eigenschaften von Kunststoffen sind zum Beispiel:

### 1. geringe Dichte

Im Vergleich zu metallischen Werkstoffen sind Kunststoffe sehr leicht. Die Dichte von Kunststoffen liegt zwischen  $0,8$  bis  $2,2 \text{ g/cm}^3$ . Schaumstoffe haben Dichten bis zu  $0,01 \text{ g/cm}^3$ ! Zum Vergleich sei hier die Dichte von Eisen angeführt, diese liegt bei  $7,87 \text{ g/cm}^3$ .

### 2. Korrosionsbeständigkeit

Kunststoffe sind beständig gegenüber Luft und Feuchtigkeit. Allerdings altern die meisten Kunststoffe mit der Zeit und werden hart und spröde. Je nach Art des Kunststoffs ist dieser sogar beständig gegenüber Säuren, Laugen und Salzlösungen.

### 3. thermische und elektrische Leitfähigkeit

Kunststoffe besitzen eine geringe thermische und elektrische Leitfähigkeit. Daher eignen sie sich zur Wärmeisolation und als elektrische Isolatoren.

### 4. Elastizität

Es gibt Kunststoffe mit elastischem Verhalten (zum Beispiel Kautschuk).

### 5. Verarbeitung

Kunststoffverarbeitung und Formgebung sind meist bei verhältnismäßig niedrigen Temperaturen bis etwa  $250 \text{ °C}$  ausführbar. Dies ermöglicht energiesparende Verarbeitungsprozesse. Kunststoffe sind thermisch verformbar, sodass spanende Verarbeitungsprozesse wenig benötigt werden. Dies ermöglicht einen wirtschaftlichen Materialeinsatz.



Diese besonderen Eigenschaften der Kunststoffe führen allerdings auch zu Problemen. So bedeutet eine umfassende Korrosionsbeständigkeit zum Beispiel auch, dass Kunststoffe sehr langsam oder gar nicht verrotten. Sie sind also nicht kompostierbar und lösen sich auf der Deponie oder im Meer nicht auf. Dem Recycling und der Entwicklung biologisch abbaubarer Kunststoffe wird also in Zukunft eine große Bedeutung zukommen!

Kunststoffe lassen sich durch Erwärmen und/oder Einwirken von Druck verformen. Die Kunststoffe zeigen dabei unterschiedliches Verhalten, welches eine Einteilung der Kunststoffe in Thermoplaste und Duroplaste ermöglicht.

## **Thermoplaste**

Ein Thermoplast wird beim Erhitzen über eine bestimmte Temperatur hinaus weich und lässt sich dabei immer wieder verformen. Amorphe Thermoplaste liegen als unvernetzte Polymere vor (siehe Abbildung 18.20, links). Zu den amorphen Thermoplasten gehören PMMA (»Plexiglas«), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol. Thermoplaste, bei denen amorphe und kristalline Bereiche vorliegen, bezeichnet man als teilkristallin (siehe Abbildung 18.20, rechts). Diese schmelzen beim Erwärmen. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyamid und Polyacrylnitril sind teilkristalline Thermoplaste.

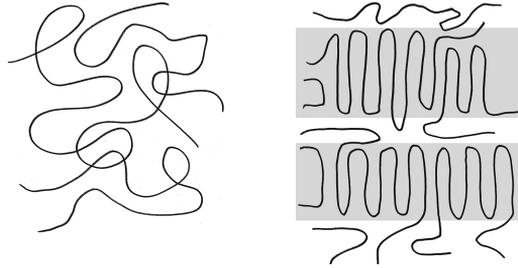


Abbildung 18.20: Schematische Darstellung von amorphen (links) und teilkristallinen Thermoplasten (rechts). Kristalline Bereiche sind grau unterlegt.

## Duroplaste

Duroplaste härten beim Erhitzen über eine kritische Temperatur aus. Beim erneuten Erwärmen werden sie nicht wieder weich, sind also nicht mehr nachträglich verformbar. Bei duroplastischen Werkstoffen liegt meist eine starke Vernetzung der Polymerketten vor (siehe Abbildung 18.21, links). Polyester, Phenoplaste, Epoxidharze und vernetzte Polyurethane sind Duroplaste.

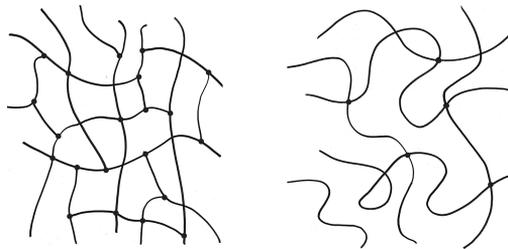


Abbildung 18.21: Schematische Darstellung eines stark vernetzten Duroplasts (links) und eines Elastomers (rechts).

## Elastomere

Elastomere sind gummielastisch verformbar, verlieren allerdings bei tiefen Temperaturen ihre Elastizität. Elastomere sind schwach vernetzte Polymere (siehe Abbildung 18.21, rechts). Elastomere Eigenschaften zeigen Naturkautschuk, die verschiedenen synthetischen Kautschuke (1,4-Polybutadien, Styrol-Butadien-Copolymer, Acrylnitril-Butadien-Copolymer, Chloropren-Kautschuk), Silikongummi und schwach vernetztes Polyurethan.

## Die Qual der Wahl

In den vorigen Abschnitten haben Sie die wichtigsten Eigenschaften von Kunststoffen kennengelernt. In Ihrer beruflichen Praxis können und müssen Sie dann entscheiden, welcher

Kunststoff für die geplante Anwendung der Richtige ist. Nach der grundlegenden Entscheidung, ob Sie einen thermoplastischen, duroplastischen oder elastomeren Werkstoff benötigen, sind dann noch viele weitere Kriterien zu beachten. Hier eine Aufzählung einiger Faktoren, die eine Rolle spielen:

- ✓ Preis des Kunststoffs
- ✓ Toxizität
- ✓ thermische Stabilität
- ✓ Beständigkeit gegen Lösungsmittel oder andere Chemikalien
- ✓ Langzeitstabilität und Alterung an Licht und Luft

