

3

Thermoplaste

Thermoplaste sind die wichtigsten synthetischen Werkstoffe. Über 90 % der technischen Kunststoffprodukte oder Konsumgüter werden aus Thermoplasten hergestellt. Daher werden sie in diesem Buch ausführlicher als Elastomere und Duroplaste besprochen. Für weiterführende Literatur zu Elastomeren und Duroplasten wird auf das Literaturverzeichnis verwiesen (Kapitel 10).

■ 3.1 Herstellung

Die zur Polymerisation erforderlichen Monomere fast aller Kunststoffe werden aus fossilen Rohstoffen, hauptsächlich aus Erdöl, gewonnen. Dabei werden nur etwa 5 % des Erdöls zur Kunststoffherstellung eingesetzt, der bei weitem überwiegende Anteil (etwa 90 %) dient zu Heizzwecken oder als Kraftstoff. Allerdings enthält Erdöl bereits die auf synthetischem Weg nur extrem aufwendig darstellbaren Aromaten. Diese sind für viele Kunststoffe, wie etwa Polystyrol, einige Polyamide, Polybutylen- und Polyethylenterephthalat, Polycarbonat und weitere Hochleistungsthermoplaste, aber auch für die meisten Arzneimittel, unverzichtbar. Mit immer weiterer Verknappung der weltweiten Erdölvorräte sollte also überdacht werden, ob das Verbrennen eines derart wichtigen Rohstoffs zum Betrieb von Fahrzeugen noch verantwortbar ist.

In den letzten Jahrzehnten wurden außerdem eine zunehmende Zahl neuer Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt. Naturkautschuk ist dagegen ein natürliches Polymer und entsteht direkt im Kautschukbaum (*Hevea brasiliensis*).

■ 3.2 Einteilung

Aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit und den daraus resultierenden Anwendungen teilt man Thermoplaste in verschiedene Gruppen auf. Allerdings sind die Übergänge zwischen diesen Gruppen fließend. Hinzu kommt, dass mittlerweile bei vielen Thermoplasten Spezialtypen mit wesentlich höherer Leistungsfähigkeit als die der zugrunde liegenden Standardtypen entwickelt wurden. Die in der Literatur verbreitete sogenannte Leistungspyramide der Thermoplaste löst nur nach Strukturen (amorph und teilkristallin) sowie nach der Temperaturbeständigkeit auf; wesentliche Parameter wie mechanische Eigenschaften oder chemische Beständigkeit bleiben unberücksichtigt. Außerdem ist die Temperaturbeständigkeit von der mechanischen Belastung abhängig. Daher hat die Leistungspyramide nur eine begrenzte Aussagekraft und wird hier nicht wiedergegeben.

Standardthermoplaste

Im Wesentlichen umfasst diese Gruppe die Polyolefine Polyethylen und Polypropylen sowie Polyvinylchlorid. Diese Thermoplaste decken bereits etwa $\frac{2}{3}$ des gesamten Kunststoffbedarfs ab. Weiterhin zählen hierzu ungeschäumte und geschäumte Polystyroltypen mit Ausnahme des schlagfesten PS-HI (oder auch HIPS), das zu den technischen Thermoplasten gezählt wird.

Technische Thermoplaste

Diese Produkte erlauben im Vergleich zu Standardkunststoffen höhere mechanische und thermische Beanspruchung. Sie weisen meist eine relativ geringe Wärmeausdehnung und Schwindung auf und sind für die Herstellung verschiedenster Formteile prädestiniert, da sie hohe Maßgenauigkeiten und Maßhaltigkeit ermöglichen. Der Marktanteil der technischen Thermoplaste liegt in der Größenordnung von 10%. Typische Vertreter sind Polybutylen- und Polyethylenterephthalat, Polyamide, Polymethylmethacrylat, Polycarbonat, Polyoxymethylen sowie diverse Blends.

Auch Polystyrol-Copolymerisate (ABS, SAN, ASA) sowie thermoplastische Elastomere werden zu den technischen Thermoplasten gezählt. PET-Blasformtypen zur Herstellung von Getränkeflaschen werden allerdings den Standardthermoplasten zugeordnet.

Hochleistungs- oder Hochtemperaturkunststoffe

Hierunter versteht man Polymere, die extreme Anforderungen insbesondere an die thermische Beständigkeit erlauben. Zwar lässt sich die Wärmeformbeständigkeit von Thermoplasten zunächst auch durch Zumischung von Glas-, Mineral- oder Carbonfasern verbessern, was aber mit einer höheren Steifigkeit und Schlagemp-

findlichkeit erkaufte wird. Ein anderer Weg ist die Verlängerung der Polymerketten durch einen höheren Polymerisationsgrad, etwa bei PE-HD-UHMW. Die hierdurch erzielbare Erhöhung der Temperaturbeständigkeit ist jedoch nur geringfügig und erfordert eine höhere Verarbeitungstemperatur. Ab einer bestimmten Kettenlänge ist diese dann so hoch, dass thermische Zersetzung des Polymeren eintritt. Beispielsweise ist PE-HD-UHMW bereits nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar. Durch geeignete Stabilisatoren lässt sich der thermische und oxidative Abbau der Makromoleküle verzögern, bei besonders hohen Ansprüchen sind jedoch speziell aufgebaute Polymere erforderlich. So führt der Einbau aromatischer Gruppen zu einer deutlichen Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit. Durch geeignete Copolymere oder durch spezielle Verknüpfung dieser aromatischen Gruppen, wie etwa über Sauerstoff- oder Schwefelatome, ist eine weitere Steigerung der thermischen Beständigkeit möglich. Produkte, die auf diese Weise erhalten werden, sind beispielsweise Polyaryletherketone, Polyimide, Polysulfone und Polyphenylensulfid. Sie weisen im Vergleich zu fluorierten Polymeren, die auch eine relativ hohe Wärmebeständigkeit aufweisen, wie etwa Polytetrafluorethylen, bessere mechanische Eigenschaften auf.

Aufgrund der hohen Preise der Ausgangsprodukte sowie der im Vergleich etwa zu Polyolefinen aufwendigen Herstellungsverfahren sind Hochleistungskunststoffe relativ teuer und werden daher nur in sehr anspruchsvollen Anwendungen eingesetzt. Oft sind die Produkte auch nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar, sodass die Verarbeitung und Formgebung entsprechend aufwendig ist. Allerdings ist es in vielen Fällen bereits möglich, die Anforderungen der Industrie mit aktuellen oder modifizierten Typen technischer Thermoplaste abzudecken.

Spezialkunststoffe

Zuweilen werden einige Produkte aufgrund oft nur einer bestimmten, aber dafür herausragenden Eigenschaft als Spezialkunststoffe zusammengefasst. Hierzu zählen beispielsweise Funktionswerkstoffe (Sonderwerkstoffe) wie elektrisch leitfähige Polymere oder auch Kunststoffe auf biologischer Basis. Spezialkunststoffe und Hochleistungsthermoplaste bilden mit zusammen etwa 2 % Anteil am Kunststoffverbrauch die kleinste Gruppe.

■ 3.3 Standardkunststoffe: Eigenschaften, Charakteristik, Anwendungen

3.3.1 Polyethylen (PE)

Mit rund 30 % Anteil an der Gesamtmenge ist Polyethylen der am meisten verwendete Kunststoff. Polyethylen ist ein teilkristalliner und unpolarer Thermoplast. Durch die Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich Molmasse, Molmassenverteilung, mittlere Kettenlänge und Verzweigungsgrad einstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte unterscheidet man in vier Haupttypen, wobei die Kurzbezeichnungen nicht immer einheitlich verwendet werden:

- Polyethylen hoher Dichte (high density), PE-HD oder HDPE
- Polyethylen mittlerer Dichte (medium density), PE-MD oder MDPE
- Polyethylen niedriger Dichte (low density), PE-LD oder LDPE
- lineares Polyethylen mit niedriger Dichte (linear, low density), PE-LLD oder LLDPE

Weitere wichtige Typen sind

- Polyethylen mit ultrahoher Molmasse (ultra-high molecular weight), PE-UHMW oder UHMWPE
- Polyethylen mit sehr niedriger Dichte (very low density), PE-VLD oder VLDPE.

Die Dichte von PE-VLD liegt zwischen 900 und 930 kg/m³; bei PE-HD zwischen 940 und 970 kg/m³.

Die niedrige Dichte der PE-LD-Typen resultiert aus dem hohen Anteil kurz- und langkettiger Verzweigungen, die eine enge Zusammenlagerung der Polymerketten verhindert. Daher haben PE-LD-Typen mit etwa 35 % auch einen geringeren Kristallisationsgrad als PE-HD-Typen (etwa 80 %). Sie haben auch eine höhere Lichtdurchlässigkeit, die bei dünnen Folien bis zur Transparenz reichen kann. Der höhere Kristallisationsgrad von PE-HD ist auch die Ursache für dessen höhere Schmelztemperatur.

Festigkeit, Härte und Steifigkeit von PE sind geringer als bei den meisten anderen Thermoplasten, allerdings weist PE hohe Dehnbarkeit und Kälteschlagfestigkeit sowie gutes Gleitreibverhalten auf. Für im Spritzgussverfahren hergestellte Formteile werden Typen mit hoher Molmasse verwendet, wobei PE-HD-UHMW aber nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar ist. PE lässt sich zu sehr festen Verstärkungsfasern verstrecken, die Festigkeit beruht dabei auf einer durch das Verarbeitungsverfahren erzielten extrem hohen Kristallinität. Die maximale Dauergebrauchstemperatur liegt je nach Typ bei etwa 60 bis 85 °C, kurzzeitig sind 80 bis 120 °C möglich (etwa 150 °C bei PE-HD-UHMW).

PE hat gute elektrische Isoliereigenschaften und besitzt eine gute chemische Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl von Säuren, Basen, Ölen und Fetten. Während PE-LD nur sehr eingeschränkt gegenüber Kohlenwasserstoffen beständig ist, kann PE-HD auch für Kraftstoffbehälter verwendet werden. (Im Allgemeinen nimmt die chemische Beständigkeit mit steigender Kettenlänge zu). Oft werden solche Behälter zusätzlich mit Barrierefolien oder einer Plasmabeschichtung ausgerüstet, da PE eine hohe Gasdurchlässigkeit (Permeation) aufweist. Starke Oxidationsmittel wie hoch konzentrierte anorganische Säuren sowie Halogene greifen PE an. PE ist brennbar und nicht witterungsbeständig, daher sind Additive wie Flammenschutzmittel und UV-Absorber erforderlich.

Die Hauptanwendung von PE sind Folien und Verpackungen, wie etwa durch Blasformen hergestellte Kanister, einfache Spritzgussteile sowie Rohre und Kabelisolationen. PE-Pulver werden zur Beschichtung von Textilien oder Papier verwendet.

Technische Bedeutung haben folgende Spezialtypen und Copolymere erlangt:

- **chloriertes Polyethylen (PE-C):** zur Erhöhung der Flammwidrigkeit von Polyolefinen oder zur Erhöhung der Schlagfestigkeit von PVC; vernetzt als witterungsbeständiges und leicht einfärbbares Elastomer für Kabelmäntel
- **chlorsulfoniertes Polyethylen (CSM):** kautschukelastisch, vernetzt für Kabelisolationen, beschichtete Gewebe, Dachfolien, Schlauchdecken und Schlauchboote
- **Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC):** bis 10 % Vinylacetat für Gewächshausfolien, Rohre, Faltenbälge mit hohem Rückstellvermögen;
 - bis 30 % Vinylacetat für thermoplastische Kabelummantelungen;
 - bis etwa 40 % Vinylacetat für Klebstoffe;
 - über 40 % Vinylacetat vernetzt als Elastomer (EVM) mit sehr hohem Füllstoffanteil fast ausschließlich für Kabelisolationen (FRNC-Kabel)
- **Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere (EVOH):** 53 bis 68 % Vinylalkohol; minimale Gasdurchlässigkeit; für Barrierefolien
- **vernetztes Polyethylen (PE-X):** Elastomer; Rohre für Warmwasser und Fußbodenheizungen
- **PE-Compounds mit etwa 6 % Stärke:** für biologisch abbaubare Produkte (Tragetaschen, Müllsäcke). Dabei wird nur die Stärke abgebaut, die umhüllende PE-Matrix jedoch nicht. Die bei PE schon vorhandene Empfindlichkeit gegenüber UV-Licht kann aber durch Einbau spezieller, UV-empfindlicher Molekülgruppen weiter erhöht werden, sodass ein fotochemischer Abbau möglich ist.
- **Cycloolefin-Copolymere (COC):** werden beispielsweise durch Copolymerisation von Ethylen mit zyklischen Olefinen wie Norbonen hergestellt. Teilkristalline Typen weisen eine hohe Wärmeformbeständigkeit und gute chemische Beständigkeit auf.

3.3.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen ist mit rund 20 % Anteil an der Gesamtproduktion der zweitwichtigste Kunststoff. Obwohl Polypropylen dem PE chemisch relativ ähnlich ist, ist es deutlich härter, fester und thermisch höher belastbar. Die maximale Dauereinsatztemperatur liegt bei etwa 100 °C. Unter 0 °C steigt jedoch die Schlagempfindlichkeit stärker an als bei PE. Spezialtypen ermöglichen sowohl höhere als auch niedrigere Einsatztemperaturen. Durch Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich neben isotaktischen und syndiotaktischen auch ataktische Polymerisate erhalten. Dies ermöglicht eine große Vielfalt verfügbarer Typen.

Die meisten Polypropylen-Typen sind isotaktisch aufgebaut. Der gleichmäßige Aufbau ist Ursache für den hohen Kristallisationsgrad und damit für die gegenüber PE-HD größere Festigkeit und Steifigkeit sowie die höheren Schmelz- und Gebrauchstemperaturbereiche. Die Methyl-Seitengruppen verhindern jedoch eine enge Zusammenlagerung wie bei PE, daher hat isotaktisches Polypropylen (PP-I) auch eine etwas geringere Dichte. Syndiotaktisches Polypropylen (PP-S) ist transparent und sehr schlagzäh, allerdings weniger steif als isotaktisches PP. Ataktisches Polypropylen (PP-R) ist amorph, bei Raumtemperatur jedoch klebrig und wird vornehmlich als Vergussmasse in der Elektroindustrie sowie als Dicht- oder Dämmmasse verwendet.

Die elektrischen Isoliereigenschaften und die chemische Beständigkeit des unpolaren PP sind mit PE vergleichbar; PP ist etwas empfindlicher gegen starke Säuren und Oxidationsmittel. PP ist wie PE brennbar und nicht witterungsbeständig. Auch hier sind entsprechende Additive erforderlich.

Aufgrund seiner hohen Dehnbarkeit und seiner relativ hohen dynamischen Belastbarkeit erlaubt PP die Herstellung von Filmscharnieren.

PP ist der Massenkunststoff mit dem stärksten Wachstum. Mehr als ein Drittel der synthetischen Fasern werden auf Basis PP hergestellt. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind Verpackungsfolien sowie starre Verpackungen. Die in jüngerer Zeit entwickelten neuen Spezialtypen finden zunehmend auch als Ersatz für technische Thermoplaste wie ABS und PA Verwendung. PP wird auch als Gehäusewerkstoff für Kleinklektrogeräte, Formteile für Haushaltsgeräte sowie für Karosserieteile (Stoßfänger) und Formteile im Innenraum von Kraftfahrzeugen eingesetzt. Im Bausektor findet PP unter anderem für Rohre, Heißwasserbehälter und Gartenmöbel Verwendung.

Wichtige Spezialtypen und Copolymere sind:

- **glasfaserverstärkte Typen (PP-GF):** mit bis zu 40 % Glasfasern für höhere Steifigkeit
- **geschäumte PP-E-Typen (expanded):** mit Dichten bis hinunter zu 10 kg/m³

- **Copolymere mit Ethylen (EPM):** oder mit Ethylen und Ethylidennorbornen, Dicyclopentadien oder 1,4-Hexadien (EPDM); dies sind bedeutende Synthesekautschuke mit guter Hitze- und Wetterbeständigkeit
- **(PP+EPDM)-Blends:** diese Produkte zählen zu den thermoplastischen Elastomeren

3.3.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Nach Polyethylen und Polypropylen belegt Polyvinylchlorid (PVC) allen Unkenrufen zum Trotz mit 15 % Anteil an der Kunststoffproduktion immer noch den dritten Platz.

Vinylchlorid wird außer als Ausgangsmonomer für PVC auch zur Pfcopolymerisation von Acrylatkautschuken und Ethylen-Vinylacetat-Copolymeren verwendet.

PVC lässt sich durch die Verwendung von Weichmachern zu einem relativ elastischen Material verarbeiten; die hierzu üblicherweise verwendeten Phthalsäureester (Phthalatweichmacher) sind jedoch toxikologisch umstritten.

Aufgrund des hohen Chloranteils in Vinylchlorid (etwa 56 %) hat Hart-PVC (PVC-U, unplasticized) eine hohe Dichte von etwa 1380 bis 1400 kg/m³. Die Dichte von Weich-PVC (PVC-P, plasticized) wird von Art und Menge des Weichmachers bestimmt. Bei einem Gehalt von 25 % Phthalatweichmacher liegt die Dichte von Weich-PVC bei etwa 1240 bis 1280 kg/m³. Wird der Anteil auf 40 % erhöht, beträgt die Dichte etwa 1150 bis 1200 kg/m³. Die geringe thermische Stabilität von PVC, die schon die technische Anwendung der ersten Vinylchlorid-Polymerisate erheblich erschwerte, erfordert auch heute noch grundsätzlich den Zusatz von Stabilisatoren. Diese basieren auf Schwermetallen wie Blei und Cadmium, werden aber zunehmend durch Produkte auf Basis von Calcium, Zinn oder Zink ersetzt. Optimal stabilisiertes PVC besitzt eine gute Witterungsbeständigkeit, lediglich besonders helle PVC-Produkte erfordern auch den Einsatz von UV-Absorbern. Zusätzlich werden auch Fließ- und Gleitmittel zugesetzt. Im Gegensatz zu anderen Thermoplasten wird PVC vielfach als Pulver angeboten. Weich-PVC ist auch als Paste durch Streichen oder Gießen verarbeitbar.

Der hohe Chloranteil von PVC-U ermöglicht die Herstellung von als flammwidrig, schwerentflammbar oder selbstverlöschend bezeichneten Produkten, eine der bekanntesten Eigenschaften des PVC. PVC-U ist zwar brennbar, erlischt aber nach Entfernen der Zündquelle. Durch Zusatz von Weichmacher wird der Chlorgehalt verringert. Bei einem rechnerischen Chlorgehalt unterhalb von etwa 30 % brennt PVC-P auch nach Entfernen der Zündquelle weiter. Dies wird zwar erst bei einer Dosierung von etwa 85 phr, entsprechend etwa 46 %, Weichmacher erreicht, aller-

dings sind viele Weichmacher selbst brennbar, sodass PVC-P oft auch bei höheren Chlorgehalten als 30 % bereits nicht mehr selbst verlischt. Dagegen wirken Weichmacher auf Basis von aromatischen Phosphaten oder Chlorparaffin wiederum als Flammenschutzmittel.

PVC setzt beim Verbrennen große Mengen an Chlorwasserstoffgas (HCl) frei. In Verbindung mit Luftfeuchtigkeit oder Löschwasser entsteht daraus korrosive Salzsäure. Die hierdurch entstehenden Brandfolgen verursachen oft höhere Schäden als der Brand selbst. Neben der ohnehin gesundheitsschädlichen und ätzenden Wirkung dieser Brandgase kann es außerdem zur Bildung geringer Mengen der toxischen polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und polyhalogenierten *p*-Dibenzodioxinen (PHDD) und Dibenzofuranen (PHDF) kommen. Diese Produkte entstehen fast immer bei der Pyrolyse organischer beziehungsweise halogenhaltiger Materialien. HCl kann auch durch Überhitzung bei der Verarbeitung freigesetzt werden. Daher sind korrosionsfeste Werkzeuge für die PVC-Verarbeitung erforderlich. Aufgrund der toxischen Wirkung von Vinylchlorid wird der Einsatz von PVC für Artikel in Kontakt mit Lebensmitteln, für Spielzeuge und insbesondere für pharmazeutische Artikel wie Infusionsschläuche in Frage gestellt.

PVC-U besitzt relativ hohe Festigkeit, Steifigkeit und einen hohen Elastizitätsmodul, allerdings relativ geringe Abriebfestigkeit und Schlagzähigkeit, insbesondere bei tiefen Temperaturen. Die Einsatzgrenzen liegen etwa bei -5 bis $+65$ °C, kurzfristig sind bis zu $+90$ °C möglich. PVC-U neigt zu sogenanntem Weißbruch (weiße Streifen, die beim Biegen aufgrund von Verstreckungen der Makromoleküle auftreten). Dieser Effekt wird bei dunkel eingefärbten Prägefolien ausgenutzt. Spezielle PVC-U-Typen sind glasklar transparent.

Durch die enthaltenen Weichmacher ist PVC-P von leder- bis gummiartiger Konsistenz. Die relativ hohe Flexibilität und Dehnbarkeit wird mit niedriger Festigkeit erkaufte. Die Elastizität verleiht PVC-P auch eine relativ hohe Schlagzähigkeit. Im Gegensatz zu echten Elastomeren treten bei Dauerbelastung jedoch hohe bleibende Deformationen auf. Gummielastisches Verhalten ist nur oberhalb der Glastemperatur eines Polymeren möglich; der wie ein Gleitmittel für die Polymerketten agierende Weichmacher senkt diese deutlich ab. PVC-P wird also im Gegensatz zu anderen Thermoplasten oberhalb der Glastemperatur eingesetzt. Die Verringerung der Glastemperatur durch den Weichmacher führt im Vergleich zu PVC-U auch zu einer gewissen Kälteflexibilität. Art und Menge des Weichmachers sowie die oft zugesetzten Füllstoffe beeinflussen die physikalischen und chemischen Eigenschaften. Übliche Weichmacherdosierungen liegen zwischen 15 und 50 % (18 bis 100 phr). Als Weichmacher werden die Ester beispielsweise der Phthalsäure, Adipinsäure, Trimellithsäure, Sebacinsäure oder Phosphorsäure verwendet, wobei Phthalate die bedeutendste Gruppe bilden. (In der organischen Chemie bezeichnet man die Verbindung aus einer Säure und einem Alkohol als Ester. In Anlehnung an die Bezeichnung der Salze in der anorganischen Chemie werden die Ester der oben

genannten Säuren als Phthalate, Adipate, Trimellithate, Sebazate und Phosphate bezeichnet). Diese Ester sind monomere Verbindungen (sogenannte Monomerweichmacher) und damit relativ leicht extrahierbar. Vor allem bei längerer Einsatzzeit sowie bei erhöhten Temperaturen ist aufgrund ihrer hohen Beweglichkeit mit einem Austreten von Weichmacher an die Oberfläche zu rechnen.

Wird PVC-P mit anderen Materialien wie Thermoplasten, Gummi oder Lacken kombiniert, vermögen die Weichmacher aus PVC-P in diese zu migrieren (hinüberzuwandern). Es findet also ein regelrechter Stoffübergang statt, der etwa bei Thermoplasten Spannungsrisse hervorrufen kann. (Dies ist auch bei Kombinationen von Thermoplasten mit Gummi zu beachten. Die meisten der in Elastomeren üblichen Weichmacher verursachen bei vielen Thermoplasten Spannungsrisse). Durch die Migration des Weichmachers aus dem PVC in andere Materialien tritt eine Härtezunahme und Versprödung des PVC-P auf.

Hochmolekulare Polyesterweichmacher (Polymerweichmacher) zeigen eine geringere Migration, sind jedoch auch weniger mit PVC verträglich. Sie führen zu einer weniger ausgeprägten Verringerung der Glas temperatur und somit zu einer geringeren Flexibilität. PVC-P kann etwa zwischen -20 und $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden, bei kurzfristigem Gebrauch sind Temperaturen bis zu $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich.

Neben Weichmachern werden auch Füllstoffe wie Kreide, Kaolin, Quarzmehl, disperse Kieselsäure oder Ruß eingesetzt. So ermöglichen etwa 5 bis 15% Calciumcarbonat (Kreide) eine leichtere Extrusion sowie deutliche Erhöhung der Kerbschlagzähigkeit. Durch einen Glasfaseranteil von 40% lässt sich der Elastizitätsmodul mehr als verdoppeln.

Die elektrischen Isoliereigenschaften von PVC-U und insbesondere von PVC-P sind nur als mittelmäßig einzustufen, sie reichen jedoch für den Einsatz in üblichen Wechselstromkabeln aus. PVC-P zeigt zudem eine relativ geringe Neigung zur elektrostatischen Aufladung.

PVC-U ist beständig gegen Säuren, Basen, aliphatische Kohlenwasserstoffe, Öle, Fette und Alkohole, aber unbeständig gegen aromatische und chlorierte Kohlenwasserstoffe, Ketone und Ester. Aufgrund der relativ guten chemischen Beständigkeit neigt das amorphe PVC-U auch kaum zur Bildung von Spannungsrisen. PVC-P ist dagegen nur gegen verdünnte Säuren und Laugen sowie wässrige Salzlösungen beständig, die meisten Kohlenwasserstoffe sind in der Lage, die üblichen niedermolekularen Weichmacher zu extrahieren.

PVC-U wird überwiegend für Rohre und Profile eingesetzt. Im Bauwesen werden bereits mehr als 50% der Fensterprofile und etwa 60% der Wasserrohre aus PVC hergestellt. PVC-P findet sich wie PVC-U in Folien, daneben in Schläuchen und Kabelisolierungen sowie in Fussbodenbelägen, Kunstleder, Kfz-Unterbodenschutz und PVC-Schäumen. PVC-Pasten werden für Imprägnierungen, beispielsweise von

Planenstoffen oder Fassadenverkleidungen, verwendet. Spritzfähige Pasten finden als Kfz-Unterbodenschutz Anwendung.

Spezialtypen und Modifikationen

Durch Pfcopolymerisation von Vinylchlorid mit einem elastischen Polymer wie etwa EVAC wird das gegenüber PVC-U um den Faktor 2 bis 5 schlagfestere PVC-HI (*high impact*) erhalten. Die Einsatztemperatur reicht in Abhängigkeit von der Zusammensetzung bis -40°C . Die Schlagzähigkeit lässt sich auch auf mechanischem Weg durch Zumischen von chloriertem Polyethylen, Butadien- oder Ethylen-copolymeren erhöhen. In den letzten Jahren wird zunehmend Acrylesterkautschuk (ACM) verwendet. PVC-HI wird beispielsweise für Straßenleitpfähle, Fensterprofile, Rollläden, Dachrinnen, Rohre, Sockelleisten und Möbelbeschläge verwendet.

Chloriertes Polyvinylchlorid (PVC-C) zeichnet sich gegenüber PVC-U durch eine höhere Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit (Dauergebrauchstemperatur etwa 85°C , kurzfristig bis etwa 100°C) aus. Die Nachchlorierung führt zu besserer chemischen Beständigkeit und Flammwidrigkeit. PVC-C wird im Wesentlichen zur Herstellung von Rohren für die Fußbodenheizung, im chemischen Apparatebau (für den Transport heißer, flüssiger Chemikalien) sowie für Kfz-Heizungssysteme verwendet. Auch für die Verpackung heißer Lebensmittel sowie für PVC-basierte Klebstoffe wird PVC-C eingesetzt.

Durch Copolymerisation von Vinylchlorid mit beispielsweise 5 bis 20 % Vinylacetat lassen sich ebenfalls flexible Produkte (PVCVAC) erhalten. Diese auch als innere Weichmachung bezeichnete Methode hat den Vorteil, dass die weichmachende Komponente nicht extrahiert werden kann. Formmassen mit bis zu 50 % Vinylacetat lassen sich bei niedrigeren Temperaturen verarbeiten, besitzen allerdings auch eine geringere Wärmeformbeständigkeit als PVC. Solche Produkte werden für spezielle Tiefziehfolien eingesetzt. Eine weitere Anwendung sind Schallplatten, die heute jedoch fast vollständig durch Compact Discs verdrängt worden sind.

Eine eher zu den Spezialprodukten zählende Stoffklasse sind Copolymerisate aus Vinylidenchlorid mit beispielsweise 5 bis 15 % Vinylchlorid oder 10 bis 20 % Acrylnitril, die allgemein als Polyvinylidenchlorid (PVDC) bezeichnet werden. (Reines Polyvinylidenchlorid zersetzt sich bei den zur Verarbeitung erforderlichen Temperaturen von $160 - 170^{\circ}\text{C}$). Die Copolymerisate weisen eine höhere Wärmeformbeständigkeit als PVC-U auf, die Einsatzgrenzen liegen zwischen -20 und $+100^{\circ}\text{C}$. Allerdings ist die geringe Gasdurchlässigkeit des PVDC von wesentlich wichtigerer Bedeutung. PVDC ist der klassische Barrierekunststoff und wird als Sperrschicht in Verpackungen eingesetzt. Gegenüber dem ebenfalls verwendeten EVOH zeichnet sich PVDC durch seine geringe Wasseraufnahme aus. PVDC hat eine gegenüber PVC noch größere Lichtempfindlichkeit und muss daher stärker stabilisiert werden.

3.3.4 Polystyrol (PS)

Die auf Styrol (Vinylbenzol) aufgebauten Kunststoffe, die auch unter dem Namen Styrenics zusammengefasst werden, sind mit etwa 10 % Anteil an der Gesamtproduktionsmenge die viertgrößte Gruppe aller Kunststoffe. Bei der Polymerisation von Vinylbenzol sind die großen Phenylgruppen statistisch verteilt, wodurch ataktisches und somit amorphes und transparentes Polystyrol entsteht. Verwendet man Ziegler-Natta-Katalysatoren, erhält man dagegen isotaktische und opake Typen. Mit Metallocen-Katalysatoren gewinnt man syndiotaktische PS-Typen, die sich durch eine sehr hohe Wärmeformbeständigkeit auszeichnen. Sie sind kristallin und opak und treten in Wettbewerb mit beispielsweise Polyamid oder sogar Polyphenylsulfid.

Die Dichte von Styrolpolymeren liegt zwischen 1030 und 1050 kg/m³. PS besitzt eine hohe Steifigkeit, mittlere Härte und Festigkeit, aber nur geringe Schlagzähigkeit. Der Dauergebrauchstemperaturbereich liegt etwa zwischen - 10 °C und + 80 °C. Spezialtypen erreichen - 30 bis + 70 °C, kurzfristig bis + 90 °C. PS ist chemisch beständig gegen Säuren und Basen, jedoch nicht bei hohen Konzentrationen, sowie gegen Fette und Öle. PS ist nicht beständig gegen Oxidationsmittel sowie aliphatische, aromatische oder chlorierte Kohlenwasserstoffe und neigt stark zu Spannungsrissbildung. PS ist in vielen Estern, Ketonen sowie in aromatischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen vollständig löslich.

Das glasklare, amorphe PS zeichnet sich durch hohe Oberflächengüte und Lichtdurchlässigkeit aus. Bei ansonsten etwas ungünstigeren elektrischen Isoliereigenschaften ist PS im Vergleich zu PE aufgrund guter dielektrischer Eigenschaften insbesondere für die Hochfrequenztechnik geeignet. Es besitzt gute Strahlenbeständigkeit, neigt aber wie alle Kunststoffe stark zu elektrostatischer Aufladung. PS ist brennbar und nicht witterungsbeständig.

PS wird hauptsächlich für Lebensmittelverpackungen und – in geschäumter Form (PS-E, *expanded*) – für Schall- und Wärmedämmung sowie für Verpackungen verwendet. Neben chemischen Treibmitteln werden auch rein physikalische Treibmittel wie Kohlendioxid oder Cyclopentan eingesetzt, die bei der Herstellung von Blöcken und Platten in den Extruder eindosiert werden. Die Druckentlastung der Schmelze nach Verlassen der Düse führt zu einer Entspannung und damit zum Aufblähen.

Die Entwicklung schlagfester Typen (PS-HI, *high impact*) durch Modifikation mit Kautschuk ermöglicht auch den Einsatz für Gehäuse in der Elektronikindustrie. Kautschuk reduziert zwar die Steifigkeit, erhöht aber die Schlagfestigkeit, insbesondere bei niedrigen Temperaturen, sowie die Spannungsrissbeständigkeit.

Ursprünglich wurde der Kautschuk bei für Polystyrol üblichen Verarbeitungstemperaturen zugemischt; eine elegantere und schonendere Methode zur Herstellung

solcher Blends ist der Weg über eine wässrige Suspension von Polystyrol und Butadienkautschuk und anschließende Trocknung. Bei den für Polystyrol üblichen Verarbeitungstemperaturen in der Größenordnung von 200 °C wird der Butadienkautschuk auch unter anaeroben Bedingungen (Luftabschluss) thermisch extrem belastet. Aktuelle Verfahren ermöglichen die Copolymerisation von gelöstem oder suspendiertem Kautschuk mit Styrol. Die Schlagzähigkeit solcher Copolymerisate ist bei tiefen Temperaturen besser als die von Blends, bei höheren Temperaturen jedoch etwas geringer. Sie kann durch Variation des Kautschukanteils eingestellt werden; er beträgt zwischen 3 und 15%. Hierdurch kann die Schlagzähigkeit bis auf den vierfachen Wert von nicht modifiziertem PS ansteigen.

Verwendete Kautschuke sind Polybutadien, Polybutadien-Styrol- oder Butadien-Acrylsäure-Copolymere. Aufgrund der besseren Witterungsbeständigkeit wird mittlerweile EPDM anstelle von Polybutadien eingesetzt.

Styrol und Butadien lassen sich in beliebigem Verhältnis miteinander polymerisieren, in der Kautschukindustrie dominieren dabei insbesondere Copolymerisate mit 23,5% Styrol. Styrol-Butadienkautschuk (SBR) stellt den mengenmäßig wichtigsten Synthesekautschuk dar. Styrol-Butadien-Styrol-Block-Copolymere (SBS) waren die ersten thermoplastischen Elastomere. Sie sind hoch transparent und besitzen ein hohes Rückstellvermögen. SBS finden Verwendung für transparente Folien, beispielsweise für die Verpackung von Fleischwaren oder zur Herstellung weicher, flexibler Spielwaren.

Die mangelnde Schlagfestigkeit und geringe chemische Beständigkeit des Polystyrols führte zu einer Reihe weiterer Modifikationen und Copolymeren (z.B. ABS, SAN, und ASA). Sie zählen wie PS-HI und syndiotaktisches Polystyrol bereits zu den technischen Thermoplasten.

■ 3.4 Technische Thermoplaste

3.4.1 Styrol-Acrylnitril-Kunststoff (SAN)

Durch Copolymerisation von Styrol mit bis zu 30% Acrylnitril kann die Dauergebrauchstemperatur auf bis zu 85 °C erhöht werden, kurzfristig ist sogar eine Temperatur von 95 °C möglich. Obwohl Polyacrylnitril (PAN) kristallin ist, sind die erhaltenen Styrol-Acrylnitril-Copolymere (SAN) amorph. Um die leicht gelbliche Eigenfarbe von SAN, hervorgerufen durch Acrylnitril, zu überdecken, werden Blaupigmente zugesetzt, wodurch sich glasklar transparente Artikel herstellen lassen. Der Zusatz von Acrylnitril erhöht auch die Chemikalienbeständigkeit. So ist SAN im Vergleich zu PS beständig gegen aliphatische, jedoch nicht gegen aromatische

oder halogenierte Kohlenwasserstoffe. Auf die gleiche Weise wird durch Copolymerisation von Butadien mit Acrylnitril der auch als Nitrilkautschuk bezeichnete Butadien-Acrylnitril-Kautschuk hergestellt, der mit steigendem Acrylnitrilgehalt eine immer bessere Beständigkeit gegen Öle und Kraftstoffe aufweist. Homopolymerisate aus reinem Acrylnitril, also Polyacrylnitril (PAN), wären ideale Thermoplaste mit hoher Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit, lassen sich aber aufgrund ihrer relativ niedrigen Zersetzungstemperatur nicht thermoplastisch verarbeiten. PAN ist jedoch in bestimmten Lösungsmitteln löslich und wird durch Verspinnen aus solchen Lösungen zu Kunstfasern (Acryl) verarbeitet.

SAN ist witterungsbeständig, jedoch werden aufgrund der möglichen Vergilbung für solche Anwendungen UV-Stabilisatoren empfohlen. Die Dichte von SAN liegt bei 1070 bis 1080 kg/m³. SAN wird hauptsächlich für Haushaltswaren verwendet; daneben findet es für verschiedene Teile in der Elektronikindustrie Anwendung. Durch Zusatz von Glasfasern lassen sich Produkte mit hoher Steifigkeit und geringer Schwindung herstellen. SAN-GF-Typen werden beispielsweise für Spulenkörper in der Elektronik verwendet, ihre Dichte beträgt 1350 bis 1360 kg/m³.

3.4.2 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoff (ABS)

Die Schlagzähigkeit von Copolymerisaten aus Styrol und Acrylnitril (SAN) kann durch mechanisches Zumischen von Polybutadien auf das fünf- bis zehnfache reinen Polystyrols verbessert werden. Zur besseren Verträglichkeit der Komponenten solcher Blends wird Polybutadien vorher mit Acrylnitril und Styrol gefropft. Das SAN-Basispolymer enthält zwischen 20 und 35 % Acrylnitril, der Gesamtverbund kann bis zu 40 % Kautschuk enthalten. Die auf diese Weise erhaltenen Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate (ABS) sind mehrphasige Produkte, ihre Dichte liegt zwischen 1030 und 1070 kg/m³. Obwohl ABS amorph ist, sind die meisten Typen opak. Transparente Produkte erhält man durch gleichzeitiges Pfropfen des Kautschuks mit Polymethylmethacrylat. Die Einsatzgrenzen von ABS liegen etwa zwischen - 40 und + 85 °C bei dauerndem und bis zu + 100 °C bei kurzfristigem Einsatz; die Chemikalienbeständigkeit ist vergleichbar mit der von SAN.

ABS ist nicht witterungsbeständig und wegen der ungesättigten Butadienbausteine oxidationsempfindlich. Daher wird bei einigen Typen Butadienkautschuk durch EPDM ersetzt (AES); Fertigteile werden bei Bedarf beschichtet (z. B. mit Polyvinylidenfluorid, PVDF) oder lackiert. Von besonderer Bedeutung ist die Möglichkeit der Galvanisierung der Oberfläche zur Herstellung von beispielsweise verchromten Kunststoffteilen. ABS nimmt bei den technischen Kunststoffen den mengenmäßig größten Anteil ein und wird hauptsächlich für Kfz-Innenraumteile sowie für Anwendungen in der Elektrotechnik und Elektronik verwendet. ABS ist mit vielen anderen Thermoplasten verträglich; technisch wichtige Blends sind solche mit Po-

lycarbonat (PC), Polyamid (PA) oder thermoplastischen Polyurethan-Elastomeren (TPU).

Bei (PC+ABS)- und (PC+AES)-Blends wird durch PC die Zähigkeit und Wärmeformbeständigkeit gegenüber ABS oder AES erhöht. Auf der anderen Seite wird die Verarbeitbarkeit durch die relativ niedrige Schmelzeviskosität des SAN gegenüber reinem PC verbessert. (ABS+PA)-Blends verringern die für Polyamid typischen hohen Maßänderungen bei gleichzeitig erhöhter Kälteschlagzähigkeit. Sie haben sehr gute Fließeigenschaften und erlauben die Herstellung fein strukturierter, matter Oberflächen. Da die beiden Polymere nicht miteinander verträglich sind, werden bevorzugt Block-Copolymere (wie SBS) als sogenannte Phasenvermittler eingesetzt. Sie reichern sich an den Phasengrenzen an und bieten so den beiden Hauptkomponenten ideale Partner, um die Wechselwirkungen zueinander zu erhöhen. Aufgrund der möglichen Variationen von Acrylnitril- und Butadienanteil ergeben sich eine Vielzahl verfügbarer ABS-Typen. Weitere Modifikationen erhält man durch Verwendung spezieller Styrolerivate wie α -Methylstyrol anstelle herkömmlichen Styrols, oder durch Kombination von Styrol und Maleinsäureanhydrid (SMA) sowie deren Blends mit ABS.

3.4.3 Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Kunststoff (ASA)

Wird das in ABS üblicherweise verwendete Polybutadien durch Acrylesterpolymere wie Polybutylacrylat (Acrylatkautschuk) ersetzt, lassen sich witterungsbeständige Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copolymere (ASA) herstellen. Hier ist wie bei AES eine Lackierung nicht erforderlich. Die Dichte von ASA beträgt 1070 kg/m^3 , die Eigenschaften sind vergleichbar mit ABS. Aufgrund der Acrylesteranteile ist die Polarität etwas höher als die von ABS, die maximale Gebrauchstemperatur liegt etwas unterhalb der von ABS.

3.4.4 Polyamide (PA)

Polyamide werden in sehr großen Mengen zu Fasern verarbeitet, zählen aber auch zu den wichtigsten technischen Thermoplasten. Es sind teilkristalline, zähe Materialien mit hoher Festigkeit und Steifigkeit, ausgezeichneter Schlagzähigkeit sowie guter Abrieb- und Verschleißfestigkeit. Polyamide haben eine relativ niedrige Glas-temperatur und werden daher oft mit Glasfasern verstärkt. Neben der Erhöhung von Festigkeit und E-Modul steigt hierdurch die Dauergebrauchstemperatur deutlich an. Die Einsatzgrenzen reichen je nach Aufbau der Polyamide von etwa -30°C (PA11 und PA12: -70°C) bis über $+100^\circ\text{C}$, kurzfristig sind Temperaturen von etwa 140 bis 180°C und darüber möglich (PA46: bis zu 280°C).

Polyamide sind polar und gegen verdünnte Laugen, aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe, Kraftstoffe sowie gegen Alkohole, Ester, Ketone, Fette und Öle beständig. Sie sind unbeständig gegenüber starken Säuren – sie werden bereits von konzentrierter Ameisensäure bei Raumtemperatur angegriffen – und Basen sowie gegenüber chlorierten Kohlenwasserstoffen. Bei höheren Temperaturen kann Hydrolyse auftreten.

Polyamide sind jedoch diesbezüglich unempfindlicher als Polyester. Polyamide, insbesondere PA12, sind auch weniger anfällig für Spannungsrisse. Bei Einsatz im Freien sollten Polyamide gegen den Einfluss der UV-Strahlung stabilisiert werden. PA12 besitzt bei entsprechender Stabilisierung bereits eine gute Witterungsbeständigkeit.

Die elektrischen Isoliereigenschaften von Polyamiden sind nur mäßig. Polyamide sind in Abhängigkeit von ihrem Aufbau opak (undurchsichtig) bis durchsichtig. Es ist möglich, glasklar transparente Folien herzustellen.

Die Bezeichnung Polyamid leitet sich von der typischen Struktur eines Carbonsäureamids ab. In der Biochemie findet man die gleiche Struktur in Peptiden und Proteinen. (Peptide sind organische Verbindungen aus mehreren Aminosäuren. Bei mehr als 100 miteinander verknüpften Aminosäuren spricht man von Proteinen).

Der überwiegende Anteil der Polyamide wird auf Basis aliphatischer Kohlenwasserstoffe hergestellt und beruht entweder auf einem oder der Kombination zweier Ausgangsstoffe. Im ersten Fall sind dies ω -Aminocarbonsäuren (Carbonsäuren mit einer Aminogruppe am von der Carbonsäurefunktion am weitesten entfernten C-Atom) oder Lactame (cyclische Carbonsäureamide; das für PA6 verwendete ϵ -Caprolactam wurde vom Erfinder der Polyamide, W. H. Carothers, sogar als Ausgangsstoff ausgeschlossen). Aminocarbonsäuren und Lactame enthalten bereits beide für die Polykondensation erforderlichen funktionellen Gruppen. Bei zwei Ausgangsstoffen verwendet man Kombinationen aus Diaminen und Dicarbonsäuren. Die Nomenklatur der Polyamide richtet sich nach der Anzahl der Kohlenstoffatome der Ausgangsstoffe; bei Kombinationen von Diaminen und Dicarbonsäuren in genau dieser Reihenfolge (Bild 3.1 und 3.2).

Durch die Kondensationspolymerisation entstehen lineare, teilkristalline Polyamide mit ausgeprägter Polarität. Die aus den Polymerketten herausragenden CO- und NH-Gruppen bewirken durch Wasserstoffbrückenbindungen eine starke Anziehung von Polymermolekülen untereinander, was eine Erhöhung der Glas- und Schmelztemperaturbereiche verursacht (Bild 3.3). Gleichzeitig sind die Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoffbrücken und die hohe Polarität allerdings auch die Ursache für die hohe Feuchtigkeitsaufnahme der Polyamide.

Im Vergleich zu anderen Thermoplasten nehmen Polyamide relativ viel Wasser auf (je nach Typ bis etwa 3,7 %, andere Thermoplaste liegen deutlich unter 1 %). Hiermit ist eine Volumenzunahme von bis zu 0,3 % pro 1 % Wasseraufnahme verbun-

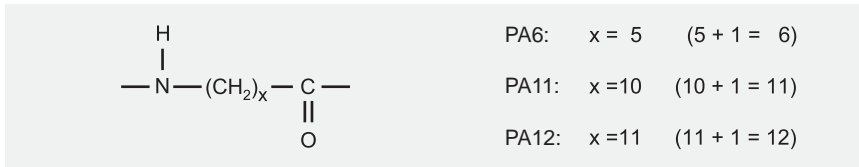


Bild 3.1 Grundstruktur von Polyamiden aus einem Ausgangsstoff, nach [11]

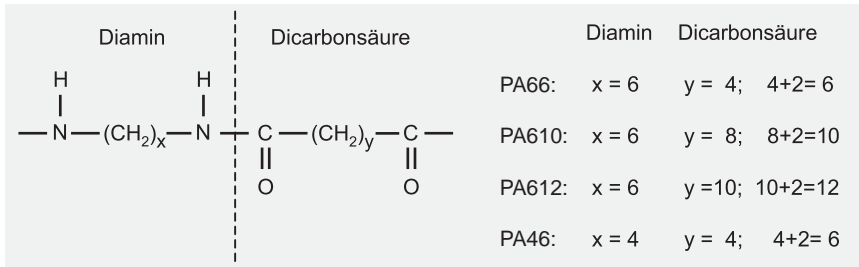


Bild 3.2 Grundstruktur von Polyamiden aus zwei Ausgangsstoffen, nach [11]

den, die bei der Werkzeugauslegung berücksichtigt werden muss. Wie alle Thermoplaste müssen daher insbesondere Polyamide vor der Verarbeitung gründlich getrocknet werden, um Oberflächenfehler oder Dampfeinschlüsse zu vermeiden. Unmittelbar nach ihrer Herstellung sind Formteile oder Halbzeuge aus Polyamiden relativ hart und verhalten sich mehr oder weniger spröde. Für optimale Schlagzähigkeit und Verschleißfestigkeit ist ein bestimmter Feuchtegehalt (beispielsweise 3 bis 4 % bei PA6 und PA66) erforderlich. Daher werden Formteile und Halbzeuge nach ihrer Herstellung durch Lagerung in warmem Wasser oder feuchter Atmosphäre konditioniert. Je nach Materialdicke kann die Wasseraufnahme mehrere Wochen bis Monaten in Anspruch nehmen. Der Wassergehalt beeinflusst, wie auch der herstellbedingte Kristallisationsgrad oder die Art und Menge der eingesetzten Additive, die mechanischen Eigenschaften und die chemische Beständigkeit der Polyamide.

Polyamide haben aufgrund ihrer hohen mechanischen Festigkeit viele Metallteile im Fahrzeugbau verdrängt, was ihr Haupteinsatzgebiet ist. Anwendungsbeispiele sind Lampengehäuse, starre Kraftstoffleitungen und -tanks, Gas- und Kupplungspedale. Glasfaserverstärkte Polyamide weisen eine deutlich höhere Wärmeformbeständigkeit als unverstärkte Typen auf; in Kombination mit der guten Ölbeständigkeit von Polyamid eignen sich diese Materialien für viele Anwendungen im Kfz-Motorraum. Aufgrund der Gewichtsersparnis und der Möglichkeit zur rationalen Fertigung hochbelastbarer Teile mit komplizierten Geometrien werden glasfaserverstärkte Polyamide auch in Hybridbauweise (Kombination unterschiedlicher Werkstoffe) mit Stahl und neuerdings Aluminium für Strukturbauteile wie etwa

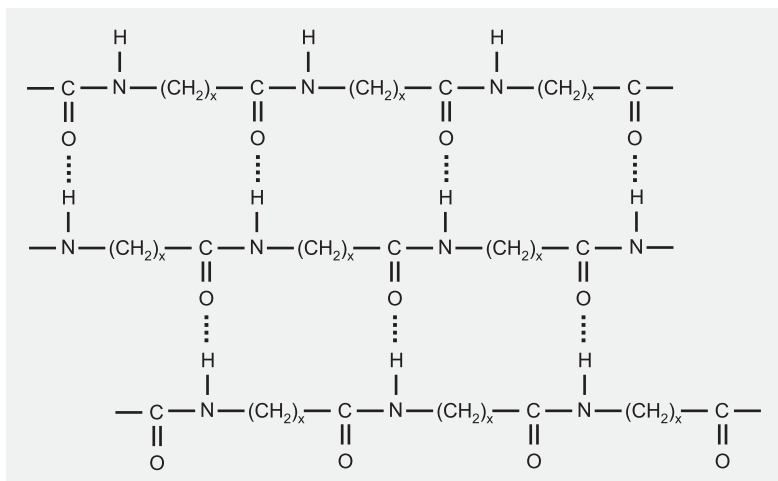


Bild 3.3 Wasserstoffbrückenbildung bei Polyamiden

Stoßfänger eingesetzt. (Strukturbauteile haben eine für die Struktur des Fertigteils tragende Funktion, beispielsweise Karosserieteile von Fahrzeugen). Eine weitere typische Anwendung sind Gehäuse für Elektrowerkzeuge.

Polyamide werden auch als Gehäusematerial für elektronische Bauelemente wie Transistoren oder Computerchips verwendet, da sie kurzfristig Temperaturen bis über 260 °C, wie sie beim Lötten der Bauelemente auftreten, ohne wesentliche Formänderung erlauben, und sich mit halogenfreien Flammenschutzmitteln ausrüsten lassen. Andere Einsatzgebiete sind Filter- und Pumpengehäuse, spezielle Dichtungen und Treibriemen sowie Gleitlager.

In der Feinmechanik werden Polyamide zur Herstellung von Zahnrädern, Rollen, Schrauben und Muttern verwendet. Polyamide dienen auch als Werkstoff für Filtergewebe, z. B. bei Dialysefiltern. PA12-Pulver wird beim Rapid Prototyping durch Lasersinterung verwendet. PA-RIM, ein Blockcopolymer auf Basis von PA6, lässt sich nach dem Reaktionsgießverfahren (RIM = Reaction Injection Molding) verarbeiten und wird ebenfalls für die Herstellung von Prototypen eingesetzt. PA6 und PA12 sind mit etwas höherer Molmasse auch als Gusstypen (PA6-G, PA12-G) verfügbar.

Spezialtypen

Teilkristalline aliphatische Copolyamide erhält man durch Kombinationen von Ausgangsstoffen, die für sich genommen schon die Herstellung von Polyamiden ermöglichen, beispielsweise von Lactamen einerseits und Diaminen und Dicarbonsäuren andererseits. Solche Copolyamide werden durch einen Schrägstrich gekennzeichnet, etwa PA6/66, PA6/12, PA66/610. Copolyamide wie PA6/66 sind in

wässrigen alkoholischen Lösungen löslich und werden für Elektroisolierlacke eingesetzt.

Die hohe Schlagzähigkeit von Polyamiden kann durch Zusatz von Kautschuken wie gepfropftem Butadien- oder Acrylatkautschuk oder EPDM noch weiter verbessert werden.

Blends aus PA mit PE, PP oder ABS zeigen gegenüber reinem Polyamid eine deutlich reduzierte Feuchtaufnahme. Die unterschiedliche Polarität dieser Polymere erfordert dabei den Einsatz von Phasenvermittlern. Solche Blends zeichnen sich durch eine gegenüber den reinen Polyamiden verringerte Maßänderung sowie (mit ABS) höhere Kälteschlagzähigkeit aus. Außerdem kann auf diese Weise die zeitraubende Konditionierung deutlich verringert werden oder sogar entfallen. Polyamid-Blends mit Kautschuken wie EPM werden aufgrund ihrer hohen Zähigkeit unter anderem für Gehäuse mit höchster Kälteschlagzähigkeit, aber auch für Baudübel verwendet.

In jüngerer Zeit werden verstärkt teilaromatische Polyamide verwendet. Je nach Zusammensetzung sind sie amorph und glasklar oder teilkristallin. Der Einbau der relativ sperrigen aromatischen Gruppen verleiht den Produkten eine geringere Wasseraufnahme und Schwindung, hohe mechanische und thermische Belastbarkeit und eine gegenüber aliphatischen Polyamiden verbesserte Medienbeständigkeit, allerdings eine etwas verringerte Schlagzähigkeit. Die Dauereinsatztemperaturen liegen je nach Zusammensetzung bei 120 °C bis etwa 200 °C. Sie werden hauptsächlich für technische Teile mit hohen Anforderungen an Festigkeit und Temperaturbeständigkeit, etwa im Motorraum von Kraftfahrzeugen, eingesetzt. Mit aromatischen Monomeren wie Paraphenylendiamin modifiziertes PA6 besitzt mit 500 °C eine so hohe Schmelztemperatur, dass es nicht mehr thermoplastisch verarbeitbar ist, jedoch aus Lösungen zu hochfesten und temperaturbeständigen Fasern versponnen wird.

Reine aromatische Polyamide (Aramide) bestehen hauptsächlich aus Poly(*p*-phenylen-terephthalamid, PPTA). Sie besitzen eine sehr hohe Temperaturfestigkeit, gute chemische Beständigkeit, große Reißfestigkeit, hohen Dehnungswiderstand sowie hohe Schlagzähigkeit. Aramidfasern finden für Schutzkleidung (Schnitt- und Feuerschutz, Ballistik), hoch beanspruchte Sportgeräte (Ruderboote und Kajaks), Trag- und Spannseile sowie in Hochleistungsreifen Verwendung.

3.4.5 Polymethylmethacrylat (PMMA)

Polymethylmethacrylat ist ein amorpher und glasklarer, harter und steifer Kunststoff. Er ist jedoch relativ spröde und weist eine nur geringe Schlagfestigkeit auf. Seine Einsatzgrenzen liegen etwa zwischen - 40 und + 85 °C, kurzfristig sind bis

zu + 100 °C möglich. PMMA hat eine ausgezeichnete Lichtdurchlässigkeit von bis zu 92% und lässt sich auch transparent einfärben. Aufgrund seiner optischen Eigenschaften und seiner chemischer Zusammensetzung wird PMMA auch als Acrylglas oder kurz als Acryl bezeichnet. PMMA hat gute elektrische Isoliereigenschaften und ist beständig gegen verdünnte Säuren und Laugen sowie gegen aliphatische Kohlenwasserstoffe und Öle. Von Estern, Ketonen, aromatischen und chlorierten Kohlenwasserstoffen wird PMMA angegriffen; es neigt zu Spannungsrissbildung. Die Witterungsbeständigkeit von PMMA ist sehr gut, sodass UV-Stabilisatoren nicht erforderlich sind.

PMMA wird vorwiegend für Steg- oder Massivplatten im Bausektor, für Lichtwerbung und für Halbzeuge (Rohre, Stangen) eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Fahrzeugrücklichter, beleuchtete Hinweisschilder, Leuchten- und Bildschirmabdeckungen sowie verschiedene optische Teile, außerdem komplette Badewannen und Waschbecken. Spezielle PMMA-Typen sind gießfähig und werden als Klebstoffe oder zum Eingießen von Demonstrationsobjekten verwendet. Mit mineralischen Füllstoffen werden marmorähnliche Produkte für den Sanitärbereich sowie für Küchenarbeitsplatten in Gießformen hergestellt.

Versuche, PMMA als Datenträgermaterial anstelle des teureren Polycarbonats einzusetzen, scheiterten an der geforderten Wärmeformbeständigkeit und der ungenügenden Maßhaltigkeit. Zwar zeigt PMMA gegenüber PC eine geringere Doppelbrechung, die deutlich höhere Wasseraufnahme begünstigt jedoch die Neigung zu Verzug.

Spezialprodukte

Durch Pfropfcopolymerisation mit styrolmodifizierten Acrylatkautschuken sind schlagzäh eingestellte Typen (PMMA-HI) möglich. Hierdurch kann jedoch die ansonsten sehr gute Witterungsbeständigkeit beeinträchtigt und ein Zusatz von UV-Absorbern erforderlich werden.

Auch Blends aus PMMA und ABS weisen gegenüber reinem PMMA eine höhere Schlagfestigkeit auf. Anwendungen sind verschiedene Kfz-Teile sowie Badewannenbeschichtungen. Durch den ABS-Anteil sind solche Produkte außerdem galvanisierbar.

3.4.6 Polyethylenterephthalat (PET)

Polyethylenterephthalat ist mit etwa 6% Anteil an der Gesamtmenge der produzierten Kunststoffe einer der bedeutendsten Thermoplaste. Ursprünglich nur für Fasern verwendet, wird heute etwa ein Viertel der produzierten Menge für Verpackungen und Halbzeuge eingesetzt. PET-Fasern werden mittlerweile auch aus re-

cycelten PET-Flaschen hergestellt. Der größte Teil der in Deutschland produzierten PET-Flaschen wird nach Gebrauch in China zu Polyesterfasern für Fleecestoffe recycelt.

Die Eigenschaften von PET hängen von der Kristallinität ab. PET ist zwar teilkristallin, aufgrund seiner sehr langsamen Kristallisationsgeschwindigkeit kann es in Abhängigkeit vom jeweiligen Typ und den Verarbeitungsbedingungen auch im amorph-transparenten Zustand vorliegen. Die Kristallisation setzt unterhalb von etwa 80 °C ein, lässt sich aber auch durch Recken und thermische Nachbehandlung reduzieren.

Das teilkristalline PET-C besitzt eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, jedoch nur eine geringe Schlagzähigkeit. Die Neigung zur Verformung durch Kriechen ist relativ gering, PET-C besitzt außerdem gute Abriebfestigkeit. Die Einsatzgrenzen liegen etwa zwischen – 20 bis zu + 120 °C Dauertemperatur, kurzfristig sind bis zu 200 °C möglich. Unter Sauerstoffausschluss sind Dauertemperaturen bis zu 135 °C möglich. Allerdings fällt der Elastizitätsmodul ab etwa 80 °C deutlich ab. Amorphes PET-A ist transparent und besitzt eine etwas bessere Schlagzähigkeit und Dimensionsstabilität, dafür eine geringere Härte und Steifigkeit als teilkristallines PET-C. Die Einsatzgrenzen liegen mit – 40 bis + 60 °C (100 °C unter Luftabschluss) deutlich unterhalb der von PET-C. Amorphes PET ist bis zu etwa 5 mm Wandstärke transparent und zeigt im Vergleich zu teilkristallinem PET eine bessere Beständigkeit gegenüber perchlorierten Kohlenwasserstoffen.

PET besitzt nur mittlere elektrische Isoliereigenschaften. Es ist polar und beständig gegenüber verdünnten Säuren, aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, Ölen, Fetten und Alkoholen, jedoch nicht gegenüber halogenierten Kohlenwasserstoffen und Ketonen. Da PET chemisch zu den Estern gehört, ist es unbeständig gegenüber heißem Wasser und Alkalien. Die relativ geringe Durchlässigkeit für Sauerstoff und CO₂ ermöglicht den Ersatz von etablierten Verpackungsmaterialien wie Glasflaschen und Metaldosen, auch für CO₂-haltige Getränke. Um die Barriereigenschaften weiter zu erhöhen, werden solche Behälter in der Regel plasmabeschichtet. Der Einbau sperriger Moleküle wie Isophthalsäure oder 1,4-Cyclohexandimethylol bewirkt eine sterische Hinderung (Verzögerung von Reaktionen aufgrund räumlicher Strukturen) und damit eine verringerte Kristallisationsneigung. Auf diese Weise lassen sich auch aus PET-C transparente Teile herstellen.

Hauptanwendungen von PET sind blasgeformte Flaschen. Diese haben bereits in erheblichem Maße Verpackungen aus Metall oder Glas verdrängt. PET-Getränkeflaschen mit geringer Wandstärke sind Einwegflaschen, dickwandige Flaschen sind Mehrwegflaschen. PET-A wird außerdem als Trägermaterial für fotografische Filme und Magnetbänder, Schreibfolien, Klebebänder sowie für Elektroisierfolien eingesetzt. PET-C Formteile finden sich in elektrischen Kleingeräten; weitere Einsatzgebiete sind Zahnräder, Rollen und Möbelbeschläge sowie Fasern.

3.4.7 Polybutylenterephthalat (PBT)

Polybutylenterephthalat (PBT) besitzt eine bessere Fließfähigkeit, jedoch eine etwas geringere mechanische Festigkeit als das mit ihm verwandte PET. Seine Einsatzgrenzen liegen etwa zwischen -40 und $+100$ °C, kurzfristig bis 165 °C. Hinsichtlich Schlagzähigkeit, vor allem bei tiefen Temperaturen, und elektrischen Isoliereigenschaften zeigt PBT leichte Vorteile gegenüber PET. PBT ist ebenfalls polar, die chemische Beständigkeit ähnelt der von PET, allerdings ist die Beständigkeit von PBT gegen verdünnte Basen geringfügig besser. Dafür ist PBT im Gegensatz zu PET nicht beständig gegen aromatische Kohlenwasserstoffe. Aufgrund der besseren Fließfähigkeit wird PBT gegenüber PET bei der Herstellung von Spritzgussartikeln bevorzugt.

Wichtige Anwendungen für PBT sind großflächige Kfz-Außenteile, auch in Blends mit Polycarbonat. Glasfaserverstärkte Blends aus PBT und ASA sind besonders verzugsarm und werden beispielsweise für Spiegelgehäuse verwendet.

3.4.8 Polycarbonat (PC)

Polycarbonate zählen chemisch ebenfalls zu den Polyestern. Die technisch bedeutenden aromatischen Polycarbonate werden durch Polykondensation aus Bisphenol A und Phosgen in flüssiger Phase oder aus Bisphenol A und Diphenylcarbonat in der Schmelze hergestellt. Kennzeichen dieser amorphen und polaren Produkte ist die Eigenschaftskombination aus hoher Transparenz, hoher Wärmeformbeständigkeit und sehr guter Schlagzähigkeit, daneben weisen sie mittlere bis hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie einen hohen Kriechmodul und gute Maßhaltigkeit auf. Die Dauereinsatztemperatur liegt zwischen -40 und $+130$ °C, kurzfristig sind bis etwa $+150$ °C möglich. Durch Schlagzähmodifikation kann die untere Einsatztemperatur bis auf etwa -60 °C gesenkt werden. Allerdings ist PC kerbempfindlich und weist nur eine geringe Abriebfestigkeit auf. Bei Anwendungen wie Scheinwerferstreukscheiben werden daher zusätzlich Kratzfestlacke (z.B. auf Basis organischer Siliziumverbindungen) aufgebracht, die auch als Schutzschicht die chemische Beständigkeit, etwa gegenüber Reinigungsmitteln, verbessern. PC hat gute elektrische Isoliereigenschaften und ist beständig gegen verdünnte Säuren, viele Öle und Fette sowie gegen Ethanol, jedoch unbeständig gegen Basen, aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe sowie Ketone und Ester. Als Polyester ist es hydrolyseempfindlich, längere Einwirkung von heißem Wasser kann zu Spannungsrissen führen. Polycarbonat muss durch entsprechende Stabilisatoren gegenüber UV-Licht geschützt werden.

Die wichtigste Anwendung von Polycarbonat sind optische Speichermedien wie Compact Discs (CD), Digital Versatility Discs (DVD) und Blu-ray Discs. Die mit hö-

herer Datendichte immer kleineren Pits (Gruben) in der Lesespur erfordern eine hochpräzise Fertigung und Spezialtypen mit extremer Fließfähigkeit sowie hoher Abblidegenauigkeit. PC zeigt hier aufgrund seiner gegenüber PMMA niedrigeren Wasseraufnahme eine geringere Verzugsneigung; daneben besitzt es eine höhere Wärmeformbeständigkeit und Schlagfestigkeit. Die Wärmeformbeständigkeit ist aufgrund der höheren Betriebstemperaturen besonders bei CD-Abspielgeräten in Autoradios wichtig.

Die Doppelbrechung von PC ist höher (ungünstiger) als die von PMMA, liegt für CDs und DVDs aber immer noch in einem akzeptablen Bereich. Unter Doppelbrechung versteht man das Auftreten unterschiedlicher Brechzahlen aufgrund von Eigenspannungen und Ausrichtung der Makromoleküle. Hierdurch entstehen Phasendifferenzen, die ab einer bestimmten Größe Lesefehler verursachen. Bei Blu-ray Discs liegen die Informationen dicht unter der Oberfläche und werden nicht durch die Substratschicht (1,2 mm bei CDs, 0,6 mm bei DVDs) ausgelesen; hier spielt die Doppelbrechung keine Rolle mehr.

Weitere Anwendungen sind Gehäuse und andere Formteile für die Elektrotechnik und Elektronik, Medizintechnik und die Kfz-Industrie. Mittlerweile werden in einigen Fahrzeugen bereits starre Seiten- und Heckscheiben sowie Dachmodule aus Polycarbonat eingesetzt. Die Kratzempfindlichkeit von Polycarbonat lässt derzeit den Einsatz beispielsweise für bewegliche Seitenscheiben noch nicht zu. Windschutzscheiben sind aufgrund der hohen Druckfestigkeit von Glas tragende Sicherheitselemente eines Fahrzeugs, Kunststoffscheiben würden sich unter entsprechender Belastung durchbiegen und sind daher nicht zugelassen.

Darüber hinaus wird Polycarbonat für optische Teile (Linsen und Brillengläser) sowie für Sportschutzbrillen und Visiere eingesetzt. Hier steht die Schlagfestigkeit im Vordergrund, daneben die Gewichtsersparnis gegenüber dem traditionell verwendeten Glas. Bei optischen Brillen werden außerdem noch Gießharze auf Basis von vernetztem, aliphatischem Polycarbonat sowie speziellen Polythiourethanen verwendet, deren Schlagfestigkeit jedoch geringer als die von aromatischem Polycarbonat ist. Allerdings erfordert die bei allen polymeren Werkstoffen im Vergleich zu Glas höhere Kratzempfindlichkeit auch hier eine spezielle Schutzbeschichtung.

Eine große Bedeutung haben Extrusionstypen für die Herstellung von Platten für den Bausektor, die als Abdeckung von Sportstadien oder Bahnhöfen sowie als Verscheibungen für Wintergärten und Gewächshäuser verwendet werden. Gegenüber dem hier ebenfalls verwendeten PMMA bietet PC erhebliche Vorteile hinsichtlich Schlagfestigkeit und Brandverhalten. So erreichen Platten aus Polycarbonat im Gegensatz zu solchen aus PMMA die speziell im Innenbereich geforderte Brandschutznorm DIN 4102 B1. Allerdings erfordert die Verwendung von Polycarbonat im Außenbereich aufgrund der gegenüber PMMA verringerten UV-Beständigkeit entsprechend stabilisierte Typen. Üblicherweise werden für solche Anwendungen

zusätzlich hochkonzentrierte UV-Absorberkonzentrate in dünnen Schichten mittels Coextrusion auf die Oberfläche aufgebracht.

Von technisch immer größerer Bedeutung sind Blends aus Polycarbonat mit ABS, PBT oder PET. In der Regel überwiegt dabei der PC-Anteil, wodurch die Wärmeformbeständigkeit gegenüber reinem ABS, PBT oder PET erhöht wird. Blends aus PC und ABS zeigen überraschenderweise bei tiefen Temperaturen eine höhere Schlagfestigkeit als die beiden Ausgangspolymere. Werden ASA oder AES anstelle von ABS verwendet, erhält man witterungsbeständige Produkte, die keine Lackierung als Schutz vor UV-Licht erfordern. PBT und PET führen im Vergleich zu reinem PC zu verbesserter chemischer Beständigkeit und damit guter Lackierbarkeit. Die hier gegenüber reinem PC verringerte Schlagzähigkeit wird durch Modifizierung mit Kautschuken wieder etwas angehoben.

Blends aus PC mit ABS, PBT oder PET werden für großflächige Karosserieteile, für Formteile im Innenraum von Kraftfahrzeugen sowie für Gehäuseteile von Elektrowerkzeugen eingesetzt. Von besonderem Interesse sind spezielle (PC+ABS)-Blends, die im Gegensatz zu reinem Polycarbonat galvanisierbar sind. Mit diesen Materialien lassen sich Zierleisten und Embleme auf relativ einfache Weise herstellen. Auch Funktionsteile wie Türgriffe werden mittlerweile aus solchen Materialien hergestellt. Eine weitere Anwendung sind abgeschirmte Gehäuse für die Elektronikindustrie.

Spezialtypen

Verzweigte PC-Typen besitzen gegenüber linearen Typen eine höhere Schmelzstandfestigkeit und werden daher bevorzugt für die Herstellung blasgeformter und extrudierter Artikel eingesetzt.

Wird bei der Herstellung von Polycarbonat ein Teil des Bisphenol A durch Bisphenol TMC ersetzt, weisen die erhaltenen Copolymerisate eine höhere Temperaturbeständigkeit auf. Sie erreichen Dauergebrauchstemperaturen bis etwa 185 °C.

Aliphatische Polycarbonate wie Diethylenglykoldiallylcarbonat werden als Linsen für Brillen eingesetzt. Sie weisen aufgrund ihrer wesentlich geringeren Molmasse (ca. 1.000 g/mol) aber nicht die Schlagzähigkeit aromatischer Polycarbonate auf. Da ihre Glasatemperatur deutlich unter dem Gefrierpunkt liegt, sind sie bei Raumtemperatur kautschukartig zäh und klebrig; unvernetzt haben sie keinerlei praktische Bedeutung erlangt. Für die Verwendung in optischen Gläsern werden sie über die Allylgruppen vernetzt. Die auf diese Weise entstandenen Produkte sind also Duroplaste.

3.4.9 Polyoxymethylen (POM)

Polyoxymethylene sind hoch kristalline Homo- oder Copolymere aus Formaldehyd oder seinem zyklischen Trimeren, Trioxan. Sie weisen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, hohe Schlagzähigkeit sowie gute Dimensionsstabilität auf. POM zeigt eine hohe Rückstellelastizität und hervorragendes Gleit- und Verschleißverhalten. Die Einsatzgrenzen liegen zwischen -40 und $+110$ °C, kurzfristig bis etwa 150 °C.

POM weist gute elektrische Isoliereigenschaften sowie eine gute Chemikalienbeständigkeit auf. Obwohl starke Säuren und Basen POM angreifen, ist es gegenüber verdünnten Säuren und Basen beständig, weiterhin gegen aromatische, aliphatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe, Öle und Alkohole. POM ist unbeständig gegen Oxidationsmittel und muss vor Witterungseinflüssen durch UV-Stabilisatoren geschützt werden. POM-Copolymere sind beständig gegenüber Basen und haben eine bessere Beständigkeit gegen heißes Wasser als POM-Homopolymere. Festigkeit und Steifigkeit lassen sich durch Glasfasern weiter erhöhen.

Hauptanwendungen für POM finden sich in der Automobil- und in der Elektroindustrie, im Maschinenbau und verschiedenen Konsumgüterprodukten. Die hervorragende Abriebbeständigkeit prädestiniert POM für verschleißanfällige Produkte in der Feinwerktechnik, wie etwa Zahnräder, Hebel und Schrauben, Beschläge in der Bau- und Möbelindustrie oder auch Schnapp- und Federelemente wie z.B. Kupplungsteile für Gartenschläuche.

3.4.10 Polyphenylenether (PPE)

Polyphenylenether (PPE) werden aus 2,6-Dimethylphenol erhalten. Gelegentlich wird auch noch die Bezeichnung Polyphenylenoxid (PPO) verwendet. Da das amorphe Homopolymer bei Temperaturen oberhalb von 100 °C beschleunigten oxidativen Abbau zeigt, werden fast ausschließlich Blends verwendet, insbesondere mit PS, mit dem es sich homogen (ohne Phasenbildung) mischt, sowie mit PA und PBT. Die am häufigsten verwendeten Blends bestehen zu gleichen Teilen aus PPE und PS. Sie besitzen eine hohe Steifigkeit und Kälteschlagzähigkeit, gutes Gleit- und Verschleißverhalten, gute elektrische Isoliereigenschaften sowie eine sehr geringe Wasseraufnahme. Die Einsatzgrenzen liegen zwischen -30 und $+110$ °C, spezielle Typen sind kurzfristig bis 130 °C belastbar. Blends aus PPE und glasfaserverstärktem PA66 sind bis etwa 210 °C wärmeformbeständig und weisen ebenfalls eine hohe Kälteschlagzähigkeit auf. PPE ist beständig gegen verdünnte Säuren und Basen, wird aber von starken Säuren und Basen sowie allen Kohlenwasserstoffen angegriffen. Die chemische Beständigkeit lässt sich durch Blends mit PA verbessern. PPE ist witterungsbeständig, neigt aber zu Spannungsrissbildung, insbesondere bei Blends mit PS.

(PPE+PS)-Blends werden überwiegend im Fahrzeugbau für Armaturentafeln und für Teile von Elektrogeräten verwendet. (PPE+PA)-Blends werden für Kfz-Karosserieteile, die online lackiert werden, eingesetzt. Hierbei werden die Kunststoffteile nicht in einem separaten Schritt, sondern gemeinsam mit der Metallkarosserie lackiert, wobei Temperaturen bis zu 200 °C auftreten. PPE lässt sich mit schwefelvernetzbaren Kautschuken zu sehr reißfesten Kunststoff-Kautschuk-Verbundwerkstoffen laminieren.

3.4.11 Polymerblends

Mischungen aus Polymeren bieten eine relativ preisgünstige Methode, verschiedene Eigenschaften miteinander zu kombinieren. Gerade bei technischen Thermoplasten hat sich dieses Verfahren durchgesetzt, um Materialien mit speziellen Eigenschaftskombinationen zu erhalten. Allerdings muss beachtet werden, dass viele Thermoplaste nicht miteinander verträglich sind und deshalb im Blend in getrennten Phasen vorliegen. Um diese Phasen möglichst klein zu halten und eine gute Haftung untereinander zu ermöglichen, werden oft Pfropfcopolymere oder Blockcopolymere als sogenannte Phasenvermittler eingesetzt. Das Bild 3.4 zeigt die Verträglichkeit verschiedener Thermoplaste.

Auf die wichtigsten Blends wird in den einzelnen Abschnitten zu den Polymeren näher eingegangen.

	PE-HD	PE-LD	PP-H	PP-HI	PVC	PS	S/B	ABS	ASA	SAN	PA	PBT	PET	POM	PC	PMMA	PSU	PES	PAEK	TPU	(PPE+S/B)
PE-HD	M																				
PE-LD	M	M																			
PP-H	U	U	M																		
PP-HI	M	M	M	M																	
PVC	U	U	U	U	M																
PS	C	C	C	C	U	M															
S/B	C	C	C	C	U	M	M														
ABS	U	U	U	U	M	U	U	M													
ASA	U	U	U	U	M	U	U	M	M												
SAN	U	U	U	U	M	U	U	M	M	M											
PA	C	C	C	C	Z	C	C	C	C	C	M										
PBT	C	C	C	C	Z	U	U	U	U	U	U	M									
PET	C	C	C	C	Z	U	U	U	U	U	U	M	M								
POM	U	U	U	U	Z	U	U	U	U	U	U	U	M	M							
PC	U	U	U	U	Z	U	U	M	M	M	C	M	M	U	M						
PMMA	U	U	U	U	M	U	U	M	M	M	U	U	U	U	M	M					
PSU	Z	Z	Z	Z	Z	U	Z	M	M	M	C	Z	U	Z	M	Z	M				
PES	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	U	Z	Z	Z	M	Z	M	M			
PAEK	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	M	M	M		
TPU	U	U	U	U	C	U	U	M	M	M	Z	U	U	M	M	M	Z	Z	Z	M	
(PPE+S/B)	C	C	C	C	Z	M	M	U	U	U	C	U	U	U	C	U	Z	Z	Z	U	M

Verträglichkeit

- M** mischbar oder miteinander verträglich
- U** unverträglich
- C** Zusatz von kommerziell zugänglichen Haftvermittlern notwendig
- Z** Zersetzung oder Vernetzung

Bild 3.4 Verträglichkeit von Kunststoffen, nach BASF [15]

3.4.12 Thermoplastische Elastomere (TPE)

Thermoplastische Elastomere werden oft als spezielle Gruppe innerhalb der Thermoplaste betrachtet, obwohl sie aufgrund ihres besonderen mechanisch-thermischen Verhaltens eine eigenständige Klasse bilden. Sie sind bei Raumtemperatur flexibel, lassen sich aber im Gegensatz zu den chemisch vernetzten Elastomeren (Gummi) bei höheren Temperaturen wie ein Thermoplast verarbeiten, die Vernetzung ist also reversibel. Die hohe Elastizität im Verbund mit der guten Festigkeit verleiht den thermoplastischen Elastomeren auch eine hohe Schlagzähigkeit und Stoßelastizität. Das je nach Temperatur elastische oder thermoplastische Verhalten thermoplastischer Elastomere beruht auf einem Verbund von harten, thermoplastischen und weichen, elastischen Komponenten in einem geeigneten Mengenverhältnis. Im Gegensatz zu Elastomeren sind die elastischen Komponenten thermoplastischer Elastomere chemisch nicht vernetzt. Ihre Bewegungsfreiheit wird durch Wechselwirkungen wie Kristallisation und Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen innerhalb der thermoplastischen Hartsegmente eingeschränkt (physikalische Vernetzung). Daher sind thermoplastische Elastomere im Gegensatz zu vernetzten Elastomeren auch in geeigneten Lösungsmitteln löslich. Chemisch bestehen TPE entweder aus Blockcopolymeren oder Polymerblends (Elastomerlegierungen), siehe Bild 3.5.

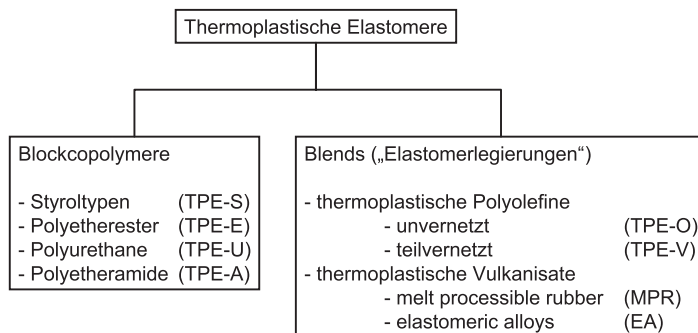


Bild 3.5 Einteilung thermoplastischer Elastomere, nach [11]

Blockcopolymere enthalten harte Phasen aus Polystyrol-, Polyester-, Polyamid- oder Polyurethansegmenten, die weichen Phasen sind aus Polyestern, Polyethern oder Polybutadien aufgebaut. Typische und älteste Vertreter sind die Styrol-Butadien-Styrol-Blockcopolymere (SBS). Die Blockbildung beruht auf der Unverträglichkeit der beiden Komponenten, sie entmischen sich lokal und lagern sich zu Blöcken zusammen.

Dabei muss die Glasübergangstemperatur der harten, thermoplastischen Segmente deutlich über der Gebrauchstemperatur liegen, die der weichen, elastischen Segmente deutlich darunter. Die Hartsegmente bilden damit innerhalb des

Gebrauchstemperaturbereichs ein Gerüst für die Weichsegmente. Wird die Glas-temperatur der Hartsegmente überschritten, beginnen sie zu erweichen und schließlich zu fließen, der Werkstoff ist nun thermoplastisch verarbeitbar.

Elastomerlegierungen sind Kombinationen aus Thermoplasten (meist Polyolefine wie PP) und Kautschuken (häufig EPDM). Bei neueren Typen wird der Kautschuk während des Mischvorgangs vernetzt, sodass eine echte gummielastische Phase erhalten wird. Hier liegt die harte Thermoplastphase neben feinverteilten Elastomerpartikeln vor, diese Materialien sind also schmelzbare Zweiphasenwerkstoffe. Neben dem Anteil an Kautschuk bestimmt der Vernetzungsgrad den elastomeren Charakter dieser Materialien.

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie die chemische Beständigkeit von thermoplastischen Elastomeren hängen vom Verhältnis der Hart- und Weichsegmente sowie deren Zusammensetzung ab. Eine der wichtigsten Charakteristika ist die Härte. Je nach Aufbau erreicht die Härte thermoplastischer Elastomere Werte in der Größenordnung vernetzter Elastomere (unter 30 bis über 90 Shore A) oder von Thermoplasten (70 – 80 Shore D, Bild 3.6).

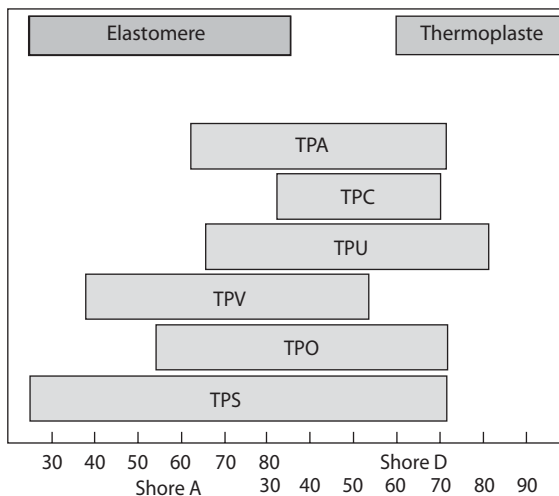


Bild 3.6 Shore-Härtebereich verschiedener Kunststoffe [15]

Die Basiseigenschaften einer Klasse thermoplastischer Elastomere lassen sich durch die Härte variieren. So ist eine geringe Härte vorteilhaft für gute Tieftemperaturflexibilität, eine hohe Härte begünstigt Wärmeformbeständigkeit, Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Druckverformungsrest und chemische Beständigkeit. Da die Härte thermoplastischer Elastomere durch den Anteil der Hartsegmente bestimmt wird, erreichen Produkte mit geringer Härte also nicht die Wärmebeständigkeit vernetzter Elastomere. Die im Vergleich zu Thermoplasten geringere Härte vieler thermoplastischer Elastomere schließt auch die Messung der Wärmeformbeständigkeit mit konventionellen Verfahren aus, da diese Materialien auch

schon bei Gebrauchstemperatur bei der hier auftretenden mechanischen Belastung nachgeben. Die Wärmeformbeständigkeit wird daher bei thermoplastischen Elastomeren (und bei den generell nicht schmelzbaren chemisch vernetzten Elastomeren) anhand des Verlaufs der Schubmodulkurve bestimmt.

Ein wesentlicher Vorteil thermoplastischer Elastomere ist die einfache Verarbeitung auf üblichen Thermoplastmaschinen. Dagegen erfordert die Herstellung vernetzter Elastomere Fachkenntnisse bezüglich des optimalen Mischungsaufbaus, spezielle Mischaggregate sowie – aufgrund der hohen Rückstellkräfte – wesentlich leistungsfähigere Verarbeitungsmaschinen. Wie bei Thermoplasten lassen sich TPE-Abfälle regranulieren und in gewissen Grenzen wiederverwerten.

Gegenüber vernetzten Elastomeren weisen die meisten thermoplastischen Elastomere eine geringere Wärmeformbeständigkeit, etwas geringeres Dehnvermögen und deutlich geringere Rückstellkraft auf. TPE haben eine höhere Neigung zu Kriechen und meist einen höheren Abrieb. Da sie nur physikalisch vernetzt sind, lassen sich viele Produkte, insbesondere bei geringen Härten, in einer Reihe von Lösungsmitteln auflösen. Andererseits zeigen TPE auf Basis von Polyurethanen (TPE-U) eine teilweise erheblich bessere Beständigkeit gegenüber Kraftstoffen und Ölen als viele chemisch vernetzte Elastomere.

Im Folgenden sollen die Eigenschaften der einzelnen Klassen thermoplastischer Elastomere skizziert werden. Die genannten Kennwerte sind stellenweise nur durch Verwendung spezieller Typen zu erreichen.

Thermoplastische Elastomere auf Basis von Polyetheramiden (TPE-A, TPA)

- Harte Phase: Polyamid, weiche Phase: Polyether oder Polyester
- Dichte: 1.010 bis 1.030 kg/m³
- Härte: 60 Shore A bis 70 Shore D
- Hohe Festigkeit, gute Kälteschlagzähigkeit
- Einsatztemperaturen: – 50 bis + 100 °C/+ 120 °C (Basis PA 6/PA 12)
- Beständig gegen verdünnte Salz- und Schwefelsäure, verdünnten Laugen und Ölen.
- Lösungsmittel und Kraftstoffe quellen das Material teilweise stark an. Hohe Wasseraufnahme.
- Sonstiges: Verarbeitung auch durch RIM möglich.
- Anwendungsbeispiele: Schläuche, Profile, Dichtungen für die Kfz-Industrie, Sportschuhe, verstärkt mit Glas- oder Kohlefasern auch für dimensionsstabile Teile wie Zahnräder.

Thermoplastische Elastomere auf Basis Polyetherester (TPE-E, TPC)

- Harte Phase: teilkristallines PBT, weiche Phase: langkettige Polyether (TPC-ET) oder Polyester (TPC-ES)
- Dichte: 1.110 bis 1.280 kg/m³
- Härte: 80 Shore A (30 Shore D) bis 80 Shore D
- Hohe Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit, gutes Rückstellvermögen, jedoch nur bei geringen Dehnungen und niedrigen Temperaturen (neigen ansonsten zum Fließen)
- Einsatztemperaturen: – 100 bis + 130 °C (bei geeigneter Stabilisierung kurzfristig bis 150 °C)
- Beständig gegen aliphatische Kohlenwasserstoffe, Treib- und Schmierstoffe, unbeständig gegen starke Säuren und Laugen, Chlorkohlenwasserstoffe und Alkohole bei längerer Einwirkungsdauer, hydrolyseempfindlich.
- Anwendungsbeispiele: Faltenbälge, Luftansaugschläuche, O-Ringe, Riemen, Rollen, Reifen für niedrige Geschwindigkeiten.

Unvernetzte (TPE-O, TPO) und vernetzte (TPE-V, TPV) thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis

Die Eigenschaften dieser Spezies sind in weiten Grenzen durch das Mengenverhältnis Polymer/Kautschuk, die Kautschukart und dessen Vernetzungsgrad steuerbar.

- TPO: harte Phase: PP, (PP + PE), weiche Phase: EPDM, unvernetzt
- TPV: harte Phase PP, weiche Phase: EPDM, Naturkautschuk („thermoplastischer Naturkautschuk“), AEM, ACM, EVM, IIR oder NBR (jeweils vernetzt).
- Dichte: 860 bis 1.300 kg/m³ (TPO: EPDM+PP), 900 bis 1.100 kg/m³ (TPV: EPDM+PP)
- Härte: 50 Shore A bis 70 Shore D (TPO), 30 Shore A – 90 Shore A (TPV: EPDM+PP)
- Mit zunehmenden elastomeren Charakter steigen Flexibilität, Rückstellvermögen und Schlagfestigkeit – besonders in der Kälte – sowie die Medienbeständigkeit, dagegen werden Härte und Festigkeit reduziert. Bei TPO sinkt außerdem die Dauergebrauchstemperatur.
- Einsatztemperaturen: – 40 bis + 80 °C (TPO), bis + 110 °C (TPV: EPDM+PP), Typen auf Basis ACM oder AEM bis über + 150 °C.
- TPO sind beständig gegen verdünnte Säuren und Laugen sowie Alkohole, jedoch unbeständig gegen Treib- und Schmierstoffe.

- TPV: NBR erhöht die Ölbeständigkeit, EVM die Witterungsbeständigkeit und Ölbeständigkeit, AEM und ACM erhöhen die Gebrauchstemperatur und die Ölbeständigkeit. IIR reduziert die Gaspermeation und erhöht die Dämpfung.
- Anwendungsbeispiele: Dichtungen für den Fahrzeugbau und im Bauwesen, Kabel, Dämpfungselemente.

Thermoplastische Elastomere auf Styrolbasis (TPE-S, TPS)

- Harte Phase: Styrol, weiche Phase: Butadien, auch als Dreiblockcopolymere: Styrol/Butadien/Styrol (SBS)
- Dichte: 900 bis 1.300 kg/m³
- Härte: < 5 Shore A bis 70 Shore D
- Hohe Festigkeit und Bruchdehnung (bis zu 800 %)
- Einsatztemperaturen von - 40 bis + 100 °C, hydrierte Materialien (Styrol-Ethenbuten-Styrol, SEBS) bis 170 °C, diese sind jedoch steifer und weniger elastisch.
- TPS sind beständig gegen verdünnte Säuren und Laugen sowie Alkohole, unbeständig gegen Treib- und Schmierstoffe und unpolare Medien. Aufgrund der ungesättigten Polybutadiensegmente sind TPS oxidationsanfällig, hydrierte Typen haben dagegen gute Witterungs- und Ozonbeständigkeit.
- TPS eignen sich aufgrund guter Haftung zu ABS, PA, PC, PMMA, PP, PS und PPO als Weichkomponente beim Mehrkomponentenspritzguss.
- Anwendungsbeispiele: Bedienelemente und Griffteile, Dichtelemente, Abdeckungen, Unterlagen, Vibrationsdämpfer, Dehnungsfugenbänder im Bauwesen.

Thermoplastische Polyurethan-Elastomere, TPE-U

Harte Phase: Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat (MDI) (aromatisch) oder 1,4-Butandiol (aliphatisch), weiche Phase: Polyester oder Polyether.

Demnach unterscheidet man in

- TPU-ARET (aromatisch/Polyether)
- TPU-ARES (aromatisch/Polyester)
- TPU-ALET (aliphatisch/Polyether)
- TPU-ALES (aliphatisch/Polyester)
- TPU-AREE (aromatisch/Polyether und Polyester)

Eigenschaftsprofil:

- Dichte: 1.100 bis 1.300 kg/m³
- Härte: 60 Shore A bis 80 Shore D
- Hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit und Weiterreißfestigkeit, Bruchdehnung bis über 500% (bei hohen Dehnungen und Temperaturen neigen TPU jedoch wie TPC zum Fließen), sehr hohe Verschleißfestigkeit, gutes Dämpfungsvermögen.

- Einsatztemperaturen: – 40 bis + 80 °C, spezielle Typen bis 150 °C.
- TPU sind beständig gegen aliphatische Kohlenwasserstoffe, Treibstoffe, Öle, Fette; unbeständig gegen heißes Wasser, Säuren, Laugen, Alkohole, aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe, Ester und Ketone.
- Anwendungsbeispiele: verschleißfeste Oberflächen (z. B. für Armaturentafeln), Faltenbälge, Kupplungselemente, Rollen, Dichtungen, Kabel, Auskleidungen von Gewebeschläuchen (Feuerwehrschräuche), Zahnriemen, Förderbänder, Sportschuhsolen, Skischuhe.

■ 3.5 Hochleistungskunststoffe

3.5.1 Fluorkunststoffe

Bei Fluorkunststoffen sind die Wasserstoffatome der Polymerketten teilweise oder vollständig durch die 19-mal schwereren Fluoratomer ersetzt, daher besitzen sie die höchsten Dichten aller Kunststoffe (PTFE: 2200 kg/m³). Fluoratomer haben im Vergleich zu Wasserstoffatomen einen weit höheren Durchmesser und eine sehr hohe Polarität, die Polymerkette wird durch die Fluoratomer regelrecht abgeschirmt. Außerdem ist die Bindung zwischen Kohlenstoff- und Fluoratomern sehr stabil. Daher zeigen Fluorpolymere je nach Gehalt an Fluoratomern eine gute bis exzellente chemische Beständigkeit auch bei hohen Temperaturen.

Das bekannteste Produkt ist Polytetrafluorethylen (PTFE). Das hochkristalline und extrem unpolare PTFE hat einen Einsatzbereich von –270 bis +260 °C, kurzfristig sind 300 °C möglich. PTFE ist jedoch nicht schmelzbar und zersetzt sich ab etwa 400 °C, daher ist eine thermoplastische Verarbeitung nicht möglich. PTFE wird vornehmlich in Form von Pulver oder Pasten durch Sintern unter Druck oder Pulverextrusion verarbeitet. Aufgrund möglicher Zersetzung durch lokale Überhitzung müssen die verwendeten Maschinen einen besonderen Korrosionsschutz aufweisen (analog zu HCl aus PVC wird bei der Zersetzung von Fluoropolymeren Fluorwasserstoff [HF] freigesetzt). Die hohe Kristallinität bedingt gleichzeitig eine hohe Schwindung der hergestellten Teile. Die mechanischen Eigenschaften sind mit Ausnahme der Schlagzähigkeit nur mäßig, außerdem neigt PTFE zum Kriechen. PTFE besitzt ein sehr gutes Gleit- und Antihafverhalten, die Abriebbeständigkeit kann durch Füllstoffe wie Graphit verbessert werden. PTFE verfügt aufgrund der abschirmenden Wirkung der voluminösen Fluoratomer über eine hervorragende chemische Beständigkeit, es wird nur von Alkalischmelzen und Fluor angegriffen. Darüber hinaus besitzt es ausgezeichnete elektrische Isoliereigenschaften, sehr gute Flammwidrigkeit sowie eine gute Witterungsbeständigkeit.

Fluorpolymere werden vielfach im Anlagenbau und der Chemietechnik verwendet, etwa für Auskleidungen und Spezialdichtungen. In der Elektrotechnik benutzt man PTFE für spezielle Schalterteile und Isolationen, beispielsweise in der Hochspannungstechnik. Die hervorragenden Gleiteigenschaften werden bei speziellen Lagern in der Bauindustrie genutzt. Mit PTFE als Füllstoff kann auch die Gleitfähigkeit anderer Polymere erhöht werden. Im Konsumgüterbereich verwendet man PTFE für Antihafbeschichtungen von Bratpfannen und Schmutz abweisende Imprägnierung von Textilien.

Aufgrund der Forderung nach thermoplastisch verarbeitbaren Fluorpolymeren wurden spezielle Copolymere entwickelt. Die bessere Verarbeitbarkeit wird mit einer im Vergleich zu PTFE reduzierten Leistungsfähigkeit und mit einem teilweise extrem hohen Preis erkauft. Als Beispiel sei Polyvinylidenfluorid (PVDF) mit einer Einsatztemperatur von -60 bis $+150$ °C genannt, das für Dichtungen, Rohre und Kabel eingesetzt wird. Eine mengenmäßig eher unbedeutende, technisch aber wichtige Anwendung für PVDF sind Piezofolien für Mikrophone, Lautsprecher, Kopfhörer sowie Druck aufnehmende Sensoren. Hier werden elektrische Ladungen durch Deformation spezieller elektrisch nicht leitender Materialien erzeugt.

3.5.2 Polyarylsulfone (PSU), Polyethersulfone (PES), Polyphenylensulfone (PPSU)

Polyarylsulfone sind aromatische Polykondensate, deren charakteristisches Merkmal Diphenylsulfongruppen sind. Neben dem namensgebenden Polysulfon (PSU) zählen zu dieser Gruppe auch Polyethersulfone (PES) und Polyphenylensulfone (PPSU).

Die meisten Polyarylsulfone sind amorph und transparent bei geringer gelblicher Eigenfarbe; teilkristalline Typen sind milchig-trüb. Die Diphenylsulfongruppe ist stark polar, somit besitzen die entsprechenden Polymere eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, sind jedoch kerbempfindlich. Die daraus hergestellten Produkte besitzen eine gute Dimensionsstabilität und geringe Kriechneigung sowie eine hohe Wärmealterungsbeständigkeit. Das gute Abrieb- und Gleitverhalten kann durch Zusatz von PTFE oder Graphit weiter verbessert werden. Die Einsatzgrenzen reichen bei PSU von etwa -100 bis $+160$ °C; PPSU ist bis 190 °C und PES bis etwa 200 °C einsetzbar. PSU besitzt gute, PES und PPSU besitzen dagegen nur mäßige elektrische Isoliereigenschaften.

Polyarylsulfone sind beständig gegenüber Säuren und Basen, Alkoholen, Fetten und Ölen, neigen jedoch zu Spannungsrissbildung. PES und PPSU sind auch beständig gegenüber aliphatischen Kohlenwasserstoffen und Treibstoffen. Polyarylsulfone werden bei längerem Kontakt von Heißwasser angegriffen. Sie sind unbeständig gegenüber aromatischen und halogenierten Kohlenwasserstoffen. PES

wird von konzentrierter Salpeter- oder Schwefelsäure angegriffen. Polyarylsulfone sind nicht witterungsstabil und müssen gegen UV-Licht geschützt werden.

Die wichtigsten Einsatzgebiete finden sich in der Elektronik, beispielsweise für temperaturbelastete Teile wie Steckerleisten oder Spulenkerne, Kondensatoren, in der Medizintechnik, beispielsweise für Atemfilter sowie in der Kfz-Industrie und im Flugzeugbau.

3.5.3 Polyphenylensulfid (PPS)

Bei Polyphenylensulfid sind Phenylengruppen durch Schwefelatome untereinander verbunden. Die unpolaren, teilkristallinen Polymere weisen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie gute Gleiteigenschaften auf, jedoch nur eine geringe Kerbschlagzähigkeit. PPS ist relativ spröde und wird daher fast immer mit Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern oder mineralischen Füllstoffen verstärkt. PPS erlaubt Dauergebrauchstemperaturen bis zu 240 °C und hat gute elektrische Isoliereigenschaften.

PPS ist beständig gegen Säuren und Basen (außer konzentrierter Salz- oder Salpetersäure), aliphatischen, aromatischen und halogenierten Kohlenwasserstoffen, Ketonen, Alkoholen und Fetten, jedoch nicht gegenüber Ölen. PPS ist selbstverlöschend. Bei UV-Einfluss wird die Oberfläche angegriffen. Die hydrolysebeständigen und dimensionsstabilen Produkte werden in der Automobil- und Elektroindustrie sowie in der Medizintechnik und in Haushaltsprodukten verwendet. Anwendungsbeispiele sind etwa Teile für Zündsysteme, Ventile, Teile für Hochtemperaturchemikalienpumpen, Laufräder, Gehäuse für integrierte Schaltkreise, Lampensockel und andere thermisch hoch beanspruchte Teile in der Elektrotechnik.

3.5.4 Polyaryletherketone (PAEK)

Polyaryletherketone bestehen aus Phenylengruppen, die über Ether- (E) oder Ketogruppen (K) miteinander verbunden sind. Durch unterschiedliche Anteile an Ether- und Ketogruppen lassen sich die Eigenschaften dieser Produkte einstellen. Dementsprechend finden sich Produkte wie PEK (Polyetherketon), PEEK (Polyetheretherketon), PEEKEK (Polyetheretherketonetherketon) und andere. Ethergruppen begünstigen die Fließfähigkeit und damit das Verarbeitungsverhalten, Ketogruppen erhöhen die Temperaturbeständigkeit. Die Produkte sind polar und teilkristallin. Sie besitzen eine hohe Steifigkeit und Festigkeit und behalten diese in einem weiten Temperaturbereich.

Polyaryletherketone sind sehr schlagzäh und besitzen eine hohe mechanische Wechselfestigkeit, gutes Gleit- und Verschleißverhalten sowie eine geringe

Kriechneigung, auch bei Einwirkung höherer Kräfte über einen längeren Zeitraum. Die Steifigkeit und Festigkeit kann durch Glas- und Kohlenstofffasern erhöht werden; unverstärkte Typen sind kerbempfindlich. Die Gleitfähigkeit kann durch Zusatz von PTFE oder Graphit erhöht werden. Die Dauergebrauchstemperaturen für die Produkte dieser Gruppe hängen von der Zusammensetzung ab und erreichen 250 °C.

Polyaryletherketone sind beständig gegen nichtoxidierende Säuren, Wasser und Wasserdampf bis 180 °C, konzentrierte Alkalien und den meisten Lösungsmitteln und Fetten. Sie sind spannungsrißbeständig (jedoch nicht gegenüber Aceton), werden aber von Oxidationsmitteln angegriffen. Schwefelsäure vermag PAEK aufzulösen. PAEK sind schwer entflammbar, im Brandfall ist die Rauchgasdichte gering, dabei sind die Brandgase auch nur wenig korrosiv. Bei Außenanwendungen sind UV-Absorber (z. B. Ruß) oder Lackierungen erforderlich.

PAEK werden in der Luft- und Raumfahrt als Ersatz für Metallteile verwendet, etwa für Flügelklappen und Nasenkappen sowie in anderen Industriezweigen, beispielsweise für Zahnräder, Ventilteller und Beschichtungen. Aufgrund der guten Biokompatibilität findet hochreines PEEK für Implantate in der Medizintechnik Verwendung.

3.5.5 Polyimide (PI)

Die duroplastischen Polyimide besitzen die höchste Wärmeformbeständigkeit aller Kunststoffe und zeigen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, die oberhalb von 150 °C sogar die von Aluminium übertrifft. Ihre Dauergebrauchstemperatur liegt zwischen – 240 und + 260 °C, sie sind im Vakuum dauerhaft bis über 300 °C einsetzbar. Polyimide besitzen ein gutes Gleit- und Verschleißverhalten, insbesondere bei Zusatz von PTFE oder Graphit. Polyimide zeigen gute elektrische Isoliereigenschaften und sind selbstverlöschend. Aufgrund der komplizierten Herstellung werden Halbzeuge direkt vom Rohmaterialhersteller geliefert.

Polyetherimide (PEI) und Polyamidimide (PAI) sind im Gegensatz zu PI thermoplastisch verarbeitbar. Sie ermöglichen Dauergebrauchstemperaturen bis etwa 170 °C (PEI) oder 260 °C (PAI).

PAI ist beständig gegenüber verdünnten Säuren und Basen, aliphatischen, aromatischen und halogenierten Kohlenwasserstoffen, Ketonen, Estern und Ethern. Es ist unbeständig gegen Wasserdampf und Alkalien bei höherer Temperatur. PEI ist beständig gegen Säuren und schwache Alkalien, Alkohole, Treibstoffe, Fette und Öle sowie gegen Heißwasser und Wasserdampf. PEI ist löslich in Methylenchlorid und Trichlorethylen.

Duroplastische Polyimide werden in der Luft- und Raumfahrt für spezielle Dichtungen, Sandwichelemente mit Titanlegierungen und Isolierungen, auch von Raumanzügen, verwendet. Im Fahrzeugsektor und im Maschinenbau findet man Polyimide in Kolbenringen und Ventilsitzen, Rollen und Lagern sowie Gleit- und Führungselementen. Polyetherimide und Polyamidimide werden in der Elektrotechnik für Verbindungselemente und Spulenkörper oder als Basismaterial für Leiterplatten eingesetzt. Für die Herstellung von transparentem Mikrowellengeschirr werden Blends aus PEI mit Polyestercarbonat (PEC) verwendet. Durch Zusatz von bis zu 5 % Polyphenylenether (PPE) lässt sich die Verarbeitbarkeit ohne wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Werte verbessern.

3.5.6 Selbstverstärkende teilkristalline Polymere (LCP)

Thermoplaste besitzen üblicherweise im geschmolzenen Zustand keine geordneten Strukturen. Speziell aufgebaute Polymere besitzen jedoch auch in Lösung oder in der Schmelze geordnete, kristalline Bereiche, die als mesogene Gruppen bezeichnet werden. Die Polymere dieser Kategorie werden flüssigkristalline Polymere (liquid crystalline polymers, LCP) genannt.

Polymere, die nur aus mesogenen Gruppen bestehen, sind thermoplastisch nicht verarbeitbar, da sie erst oberhalb der Zersetzungstemperatur (um 400 bis 600 °C) schmelzen, und müssen aus Lösung verarbeitet werden (lyotrope LCP). Sie setzen sich typischerweise aus aromatischen Polyamiden zusammen. Durch gezielten Einbau von Störstellen wie Methylengruppen erhält man thermoplastisch verarbeitbare (thermotrope) LCP.

Bei der Verarbeitung richten sich die mesogenen Zonen in Verarbeitungsrichtung aus, daher besitzen die hochkristallinen LCP im festen Zustand richtungsabhängige Eigenschaften. In Verarbeitungsrichtung sind sie hochfest und biegesteif, ähnlich wie bei glasfaserverstärkten konventionellen Thermoplasten. LCP sind auch bei hohen Temperaturen dimensionsstabil, ihre Dauergebrauchstemperaturen erreichen 185 bis 250 °C. Sie zeigen gute elektrische Isoliereigenschaften und gute Chemikalienbeständigkeit, jedoch nicht gegenüber konzentrierter Salz-, Salpeter- und Schwefelsäure und Alkalien. LCP sind schwer entflammbar, gut witterungsbeständig und weisen eine geringe Rauchgasdichte und -toxizität auf.

Die Hauptanwendungsbereiche finden sich im Bereich Elektrogeräte/Elektronik, etwa für Klemmleisten, Einbrennsockel, Steckverbinder und Faseroptiken. Daneben werden sie im Maschinenbau für Keilriemenscheiben und andere Kraft übertragende Elemente, Dichtungen, Lager und Gleitelemente verwendet. Weiterhin findet man LCP in Flugzeuginnenausstattungen sowie in Komponenten der Chemietechnik. Aus glasfaserverstärkten LCP lassen sich kleine, dünnwandige Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften und hoher Maßhaltigkeit herstellen.

■ 3.6 Spezialkunststoffe

3.6.1 Elektrisch leitfähige Polymere

Da Polymere kovalent aufgebaut sind, fehlt ihnen Elektronen die freie Beweglichkeit (Elektronengas), wie sie bei den meisten Metallen vorliegt. Daher besitzen Polymere zunächst nur eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit; in der Regel sind es gute Isolatoren. Die elektrische Leitfähigkeit kann zunächst durch Antistatika oder Oberflächenbehandlungen erhöht werden. Antistatika sollen die Gefahr elektrostatischer Aufladung verringern. Sie werden entweder in das Polymer eingemischt oder direkt auf die Oberfläche aufgetragen. Die an der Oberfläche befindlichen elektrischen Ladungen vermögen dadurch leichter abzufließen. Es wird jedoch noch keine elektrische Leitfähigkeit im Sinne einer Weiterleitung elektrischer Signale oder Energie erzielt. Eine weitere Möglichkeit bieten leitfähige Füllstoffe wie spezielle Ruße (Leitruße), Graphit, Metallflocken oder Kohlenstofffasern. Die Leitfähigkeit hängt dabei vom Füllstoffgehalt ab. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass Füllstoffe sich auf die Verarbeitung und die mechanischen Eigenschaften auswirken. Zugemischte Fasern orientieren sich außerdem in Fließrichtung, womit richtungsabhängige (anisotrope) Leitfähigkeiten auftreten. Neuere Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Zusatz von Carbon Nanotubes, winzigen Röhrchen auf Basis von Kohlenstoff. Bereits durch kleinere Mengen werden Kunststoffe so weit elektrisch leitend, dass statische Aufladung vermieden werden kann.

Eine wesentlich höhere elektrische Leitfähigkeit erreicht man mit der Metallisierung von Kunststoffoberflächen durch Bedampfen im Vakuumofen oder Galvanisieren (Electroplating). Mit diesen Verfahren lassen sich nicht nur optische Effekte erzielen, sondern auch eine Abschirmung vor elektromagnetischer Strahlung.

Technisch nutzbare elektrische Leitfähigkeiten erfordern Polymere mit ähnlich frei beweglichen Elektronen wie bei Metallen. Dies erreicht man durch sogenannte konjugierte Doppelbindungen. Dabei wechseln Doppelbindungen mit Einfachbindungen mehrfach ab. Zusätzlich werden Fremdatome eingebaut, die Elektronen abgeben oder aufnehmen und damit das Freisetzen von Elektronen aus dem Polymer begünstigen. Dieses als Dotieren bezeichnete Verfahren wird auch bei Halbleitern für die Elektronik auf Basis von Silizium oder Germanium eingesetzt.

Die auf diese Weise erzeugten intrinsisch (von innen) leitfähigen Polymere auf Basis von Polyacrylnitril wurden bereits für Akkumulatoren getestet. Polyacrylnitril ist jedoch unbeständig gegen Sauerstoff und Wasserdampf. Andere intrinsisch leitfähige Polymere basieren beispielsweise auf Polypyrrol, Polyparaphenylenvinyl, Polythiophen oder Polyanilin. Mittlerweile sind bereits Elektrolumineszenz-Systeme, etwa für Leuchtdioden auf organischer Basis (organic light emitting diode, OLED) oder dünne dreidimensionale Folien für Autoinnenraum- oder Tastaturbe-

leuchtungen im Einsatz. Solche Folien verbrauchen sehr wenig Energie und geben keine Wärme ab.

3.6.2 Biopolymere/Biokunststoffe

Die Bezeichnung Biopolymere wird sowohl für biologisch abbaubare Polymere als auch für Polymere auf Basis nachwachsender Rohstoffe verwendet. Dabei sind letztere nicht zwingend biologisch abbaubar. Biologisch abbaubare Polymere wiederum werden jedoch nicht zwangsläufig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Einige basieren auch auf petrochemischen Rohstoffen, zum Beispiel Erdöl (was in geologischen Zeiträumen wiederum als natürlicher Rohstoff betrachtet werden kann). Auch Copolymere oder Blends, die zum Teil auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden, zählt man mitunter zu den Biopolymeren. Eine konkrete Definition der Begriffe Biopolymere oder Biokunststoffe gibt es derzeit noch nicht. Es wird vorgeschlagen, die Materialien gemäß ihrer ökologischen Verträglichkeit einzustufen und den Begriff Biopolymere nur für natürlich entstandene Produkte zu verwenden. Biologisch abbaubare Polymere auf biologischer oder petrochemischer Basis sollten als Biokunststoffe bezeichnet werden (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1 Einteilung von Polymeren auf biologischer Basis

Kategorie	Gruppe	Ursprung	additiviert	biologisch abbaubar
1	Biopolymere	natürlich	nein	vollständig (Cellulose, Naturlatex, Seide, Chitin, ...)
2A	Biokunststoffe	nachwachsende Rohstoffe	nein	vollständig (TPS, PHB, PLA)
2B		petrochemische Rohstoffe	nein	vollständig (PVAL, PCL)
3	semi-biologische Kunststoffe	fotoabbaubare petrochemische Rohstoffe	nein	partiell (UV)
4A		nachwachsende Rohstoffe	nein	nein (Bio-PE, Bio-PA, ...)
4B		nachwachsende Rohstoffe	ja	nein (Celluloseester, Naturkautschukvulkanisate)
4C		Copolymere oder Blends petrochemischer und nachwachsender Rohstoffe	ja	nein (PET, PU, ...)

Weiterhin impliziert der Begriff Biopolymer, dass entsprechende Produkte grundsätzlich für den Kontakt mit Lebensmitteln oder sogar für die Medizintechnik geeignet erscheinen. Dies ist jedoch häufig nicht der Fall.

Die Forderung nach vollständigem Abbau von Polymeren durch Mikroorganismen, idealerweise zu Kohlendioxid und Wasser, etwa beim Kompostieren, setzt einen entsprechenden Aufbau der Polymere voraus. Die für effektives Kompostieren erforderliche Mindesttemperatur liegt bei etwa 40 bis 45 °C, höhere Temperaturen als 60 bis 65 °C sind ungünstig. Obwohl der Abbau im Wesentlichen durch Mikroorganismen erfolgt, steht eine zu hohe Temperaturbeständigkeit des Polymeren dem biologischen Abbau durch Kompostieren also entgegen. Dies schließt umgekehrt eine Verwendung kompostierbarer Produkte bei hohen Temperaturen, insbesondere in feuchter Umgebung, aus.

Thermoplastische Produkte auf biologischer Basis wurden schon im frühen zwanzigsten Jahrhundert entdeckt. So stellte der französische Mikrobiologe Maurice Lemoigne bereits 1926 Polyhydroxybuttersäure über Bakterien aus Zucker oder Stärke her. Die Polylactide wurden 1932 von Wallace Hume Carothers entdeckt. Gegen Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts gaben steigende Rohölpreise und ein erhöhtes Umweltbewusstsein schließlich den Anstoß zur intensiven Entwicklung von Kunststoffen auf biologischer Basis (zunächst Stärke, 1988) oder mit biologischer Abbaubarkeit. Das Eigenschaftsbild dieser Materialien war jedoch noch nicht zufriedenstellend und den wesentlich günstigeren, auf petrochemischer Basis hergestellten Polyolefinen unterlegen.

Etwa seit Anfang des 21. Jahrhunderts sind neue Materialien verfügbar, die bereits ein ähnliches Leistungsbild wie die Polyolefine aufweisen. Da die überwiegende Menge der Polyolefine für Verpackungen eingesetzt wird, liegt hier derzeit auch der Schwerpunkt für die Anwendung biologisch abbaubarer Polymere. Insbesondere die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit vieler Biokunststoffe wirkt sich günstig auf die Reduktion der Schimmelbildung bei Obst aus. Weitere Anwendungen sind Catering-Produkte wie Einwegbecher und -bestecke, Agrarfolien und spezielle Hygieneprodukte.

Mittlerweile zeichnet sich ein Trend zur Entwicklung leistungsfähigerer Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe ab. Diese Materialien sollen vergleichbare Eigenschaften zu technischen Kunststoffen aufweisen. Sie sind aufgrund der erforderlichen Additive aber nicht oder nur unvollständig biologisch abbaubar. Hierzu zählen auch Blends und Copolymere auf Basis natürlicher und petrochemisch erzeugter Rohstoffe.

Thermoplastische Produkte auf Basis von Stärke (TPS) machen derzeit noch den größten Teil der biologisch abbaubaren Kunststoffe aus. Reine TPS sind spröde und lassen sich nur durch Zusatz von Sorbitol und Glycerin thermoplastisch verarbeiten. TPS erhöht in Blends mit anderen biologisch abbaubaren Polymeren, wie speziellen Polyestern, deren Abbaugeschwindigkeit. TPS zeigt eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und ist stark hygroskopisch (wasseranziehend). Hauptanwendungen sind Agrarfolien und Bioabfallbeutel.

Weitere biologisch abbaubare Produkte sind Polyhydroxybutyrat (PHB) und Polylactid (PLA). Es handelt sich um transparente und kristalline Werkstoffe. PHB erreicht je nach Typ eine Wärmeformbeständigkeit bis über 100 °C. PHB hat außerdem gute Barriereigenschaften gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf, eine gute Beständigkeit gegen Hydrolyse und UV-Licht, allerdings auch einen sehr hohen Preis. PLA besitzt einen relativ hohen Elastizitätsmodul (über dem Niveau von ABS oder PA6), jedoch eine Wärmeformbeständigkeit noch unterhalb von Polyethylen. PLA hat eine gute Kratzfestigkeit und ist zugelassen für den Kontakt mit Lebensmitteln. Neben dem Verpackungssektor findet PLA vor allem Anwendung für Nahtmaterial in der Medizintechnik und vom Körper resorbierbare Implantate. PLA zeigt eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und ist hydrolyseempfindlich.

Schließlich seien noch die synthetisch gewonnenen Polyvinylalkohole (PVAL) sowie Polycaprolacton (PCL) erwähnt. Je nach Aufbau ist PVAL schon oberhalb von 40 °C vollständig wasserlöslich; in trockener Umgebung wird es jedoch nicht rasch abgebaut, es ist also nicht kompostierbar. PVAL wird aufgrund seiner geringen Gasdurchlässigkeit für Barrierefolien eingesetzt; allerdings zeigt es eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Weitere Anwendungsbereiche finden sich in der Papierbeschichtung sowie in Klebstoffen, speziell für cellulosehaltige Stoffe wie Holz oder Papier.

PCL ist aufgrund seiner sehr niedrigen Glastemperatur bei Raumtemperatur wachsartig und wird als Weichmacherkomponente in Blends mit anderen Biopolymeren sowie als medizinischer Klebstoff und für Abdruckmassen verwendet.

Ein vielversprechender Rohstoff für neue Biokunststoffe ist Bernsteinsäure. Das hieraus hergestellte Polybutylensuccinat (PBS) zeichnet sich durch gute mechanische Eigenschaften aus und wird als Ersatz für PET diskutiert. Dieses lässt sich bisher nur zum Teil auf biologischer Basis herstellen.

Zu den natürlichen Polymeren zählen beispielsweise Cellulose und Naturkautschuk, die bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts chemisch modifiziert werden. Reine Cellulose ist sehr gut biologisch abbaubar, lässt sich aber nicht thermoplastisch verarbeiten. Sie wird durch chemische Reaktion zu Estern wie Celluloseacetat (CA), Celluloseacetobutyrat (CAB) oder Celluloseacetopropionat (CAP) umgesetzt. Durch Zumischen von Weichmachern lassen sich diese Produkte thermoplastisch verarbeiten. Je nach Aufbau und verwendetem Weichmacher sind Celluloseester zumindest teilweise biologisch abbaubar. Anwendungsgebiete sind Griffe, Kämmen, Schreibgeräte, Knöpfe, Brillenfassungen, Lichtkuppeln, Werbeschilder, Hohlfasern für die Dialyse sowie Filme, Klebstoffe und Lacke.

Celluloseregenerate sind dagegen gut kompostierbar. Sie weisen eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme und eine gute Wasserdampfdurchlässigkeit aus und lassen sich leicht zu Folien mit guter Beständigkeit gegen Öle und Fette verarbeiten. Folien aus

Cellulosehydrat ("Zellglas/Cellophan") werden für die Verpackung von Lebensmitteln oder für Klebestreifen verwendet.

Naturkautschuk als solcher ist biologisch abbaubar und zersetzt sich durch die enthaltenen Enzyme im Laufe der Zeit, sofern keine Stabilisatoren zugesetzt werden. Es sind verschiedene Zusätze wie Vernetzungssystem, Füllstoffe, Weichmacher und Alterungsschutzmittel erforderlich, um aus Naturkautschuk Elastomere (Gummi) herzustellen. Diese Zusatzstoffe sind in der Regel nicht biologisch abbaubar; nach der erforderlichen Vernetzung sind sie außerdem physikalisch oder chemisch mit dem Polymer verbunden. Elastomere aus Naturkautschuk (oder anderen ungesättigten Polymeren, etwa Polybutadien) werden zwar langfristig unter dem Einfluss von UV-Licht und Ozon durch Spaltung der Polymerketten zerstört, jedoch dauert dieser Prozess wesentlich länger als bei den hierfür gezielt hergestellten fotoabbaubaren Polymeren. Naturkautschuk wird hauptsächlich für Autoreifen und verschiedene technische Artikel wie Förderbänder verwendet. Aufgrund des immer noch weiter steigenden Bedarfs ist langfristig auch mit einer Verknappung von Naturkautschuk zu rechnen. Der Kautschukbaum, *Hevea brasiliensis*, wächst nur in einem bestimmten tropischen Klima. Außerdem kann Naturkautschuk in vielen Anwendungen nicht durch Synthesekautschuk ersetzt werden. Daher werden gegenwärtig Versuche durchgeführt, Naturkautschuk aus anderen Pflanzen, wie etwa Löwenzahn, zu gewinnen.

Eine eher etwas exotisch anmutende Variante ist eine Folie, die im Jahr 2011 an der Harvard Universität in Boston, USA, entwickelt wurde. Das Shrilk genannte Material besteht aus Chitin und Fibroin. Das Polysaccharid Chitin ist der Baustoff für die Exoskelette von Insekten; das Protein Fibroin ist der Hauptbestandteil der Insektenseide. Daher verwendeten die Forscher am Wyss Institut der Harvard Universität Extrakte aus Krabbenschalen und Naturseide. Shrilk hat etwa die Widerstandsfähigkeit von Aluminiumlegierungen, ist aber nur halb so schwer und vollständig biologisch abbaubar.

Im Vergleich zu technischen Thermoplasten wie ABS oder PA weisen fast alle Biokunststoffe etwas kleinere Elastizitätsmoduln bei etwa vergleichbarer Schlagzähigkeit auf. PLA übertrifft hier einige konventionelle Thermoplaste aufgrund seiner hohen Kristallinität, ist jedoch auch relativ spröde. Die größte Hürde ist jedoch die unzureichende Wärmeformbeständigkeit der Biokunststoffe, die derzeit allenfalls das Niveau von PE oder PP erreicht. Polyhydroxybutyrat (PHB) und Cellulosederivate liegen geringfügig darüber. In Teilbereichen, speziell bei Verpackungen, lassen sich petrochemisch erzeugte Thermoplaste also durch Biokunststoffe ersetzen; ein gleichwertiger und vollständiger Ersatz von technischen Thermoplasten ist jedoch derzeit nicht möglich. Auch die teilweise etwas schwierige Verarbeitung spielt hier eine Rolle.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Preis; Biokunststoffe kosten derzeit ein Mehrfaches gegenüber petrochemisch gewonnenen Kunststoffen, unter anderem auch aufgrund der noch relativ geringen Produktionsmengen.

Grundsätzlich ist auch bei Polymeren auf Basis natürlicher Rohstoffe der Einsatz von Glasfasern oder Additiven wie Weichmacher, Flammschutzmittel oder Stabilisatoren zur Verbesserung des Eigenschaftsbilds möglich. Allerdings lassen sich die meisten Additive nicht biologisch abbauen und würden daher selbst nach dem Zerfall des Polymeren in der Umwelt verbleiben. Andererseits ist die Forderung nach biologischer Abbaubarkeit bei gleichzeitiger Langlebigkeit auch ein Widerspruch: biologisch abbaubare Polymere, die zwangsläufig ein ungünstiges Alterungsverhalten aufweisen, müssten durch Additive stabilisiert werden, die nicht biologisch abbaubar sind. Vollständig biologisch abbaubare Kunststoffe haben deshalb natürliche Leistungsgrenzen und lassen keine langfristigen oder technisch anspruchsvollen Anwendungen zu.

Eine Alternative zum rein biologischen Abbau stellt die Zersetzung durch UV-Licht dar. Sogenannte fotoabbaubare Kunststoffe, beispielsweise mit einem Polyethylen-Grundgerüst, enthalten gezielt eingebaute UV-empfindliche Bereiche und zerfallen zu kurzkettigen Polymerfragmenten, die jedoch biologisch nicht weiter abbaubar sind. Dieser Effekt wird bei Agrarfolien, Müllbeuteln und Tragetaschen ausgenutzt.

Nicht alle Biokunststoffe lassen sich also problemlos durch Kompostieren entsorgen, insbesondere wenn sie durch Additive aufgewertet wurden oder Bestandteile von Blends mit petrochemischen Kunststoffen sind. Wie diese, lassen sich weder natürliche Polymere noch Biokunststoffe rückstandsfrei verbrennen; die Emissionen sind teilweise wie bei petrochemischen Kunststoffen gesundheitlich bedenklich.

Da die Biokunststoffe den konventionellen Kunststoffen technisch unterlegen sind, besteht ein zweiter Ansatz darin, die bisher petrochemisch erzeugten Rohstoffe für technisch hochwertige Kunststoffe zumindest teilweise auf natürlicher Basis herzustellen. Hier steht also die technische Leistungsfähigkeit im Vordergrund; aufgrund der Ähnlichkeit zu den konventionellen petrochemisch erzeugten Kunststoffen lassen sich diese Materialien ebenfalls nicht biologisch abbauen. Sogenanntes Bio-Polyethylen wird bereits großtechnisch erzeugt. PA11 ist bereits vollständig, PA610 teilweise auf biologischer Basis verfügbar. Die Evonik Industries AG betreibt seit Anfang des Jahres 2013 eine Pilotanlage zur Herstellung von ω -Amino-Laurinsäure aus Palmkernöl. Auf diese Weise lässt sich PA12 auf biologischer Basis herstellen. Bei der Lanxess AG wurde bereits PBT auf Basis erneuerbarer Rohstoffe hergestellt, das vergleichbare Eigenschaften zu Erdöl-basiertem PBT aufweist.

Polyurethane basieren auf einer geeigneten Kombination von Isocyanaten und Polyolen. Während Isocyanate immer noch synthetisch hergestellt werden müssen,

sind Polyole auf Basis von Industriezucker, Glycerin und Sorbit schon verfügbar. Solche natural oil polyols (NOP) werden bereits seit mehreren Jahren von der Bayer MaterialScience AG hergestellt. Fettsäuren aus Rizinusöl, Soja oder Sonnenblumen sind auch Bausteine für Polyester oder Polyamide.

Die Lanxess AG plant für Ende des Jahres 2013 die Herstellung des weltweit ersten EPDM-Kautschuks unter Verwendung von Ethylen auf Basis erneuerbarer Rohstoffe. Über die Fermentierung von Zucker lassen sich möglicherweise auch Butadien oder Isopren für die Herstellung weiterer Synthesekautschuke auf biologischer Basis gewinnen.

Eine neue Rohstoffquelle ist das bisher nur als "Klimakiller" verschrieene CO₂. Mehr als 30 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekte beschäftigen sich derzeit mit der Nutzung von CO₂ als chemischem Rohstoff. So plant die Bayer MaterialScience AG nach einer bereits erfolgreich abgeschlossenen zweijährigen Testphase ab dem Jahr 2015 den Betrieb einer kommerziellen Produktionsanlage für Polyole auf Basis von CO₂. Die Grundlagen dafür wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Dream Production“ gemeinsam mit der RWTH Aachen erforscht. In einem gemeinsamen "CAT Catalytic Center" wurde ein neuer Katalysator gefunden, der die Umsetzung von CO₂ zu Polyetherpolycarbonatpolyolen erst ermöglicht. Der Energieversorger RWE Power AG stellt das benötigte CO₂ aus der Abgaswäsche des Kraftwerks Niederaußem bereit. Auch die Siemens AG und die BASF AG haben gemeinsam ein Verfahren zur Herstellung von aliphatischen Polycarbonaten auf Basis CO₂ entwickelt. Allerdings dienen aliphatische Polycarbonate nur als Zwischenprodukte; ihre mechanischen und thermischen Eigenschaften sind denen der aromatischen Polycarbonate deutlich unterlegen.

Die chemische Synthese aromatischer Verbindungen aus aliphatischen erfordert derzeit noch einen extrem hohen Aufwand. Ganz neue Möglichkeiten eröffnen sich mittlerweile jedoch durch gezielten Einsatz biochemischer Methoden. Es ist hiermit bereits möglich, aromatische Verbindungen über das Bakterium *Escherichia coli* aus Glucose zu erzeugen.

Ein dritter Weg besteht darin, petrochemische Kunststoffe mit natürlichen Materialien oder solchen biologischen Ursprungs zu mischen. Wie eingangs erwähnt, werden auch solche Blends als Biopolymere bezeichnet, obwohl der ökologische Nutzen strittig ist. Weiterhin werden bereits seit längerer Zeit mit Naturfasern verstärkte Kunststoffe großmaßstäblich für verschiedene Verkleidungen in Fahrzeugen verwendet.

Das Thema nachwachsende Rohstoffe wird zukünftig immer weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere, da die hierfür benötigten Nutzpflanzen in Konkurrenz mit Grundnahrungsmitteln treten. In einigen Regionen hat dieser Trend bereits zu einer Nahrungsmittelknappheit und drastischer Verteuerung der Lebensmittel geführt.

Im Jahr 2011 wurden weltweit etwa 1,2 Millionen Tonnen Biokunststoffe hergestellt, was einem Anteil von etwa 0,4 % der gesamten Kunststoffproduktion entspricht. Für das Jahr 2016 wird eine Gesamtproduktion von etwa 6 Millionen Tonnen vorhergesagt. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass langfristig bis zu 70 % der Verpackungen oder etwa 10 % der bislang petrochemisch erzeugten Kunststoffe durch Biokunststoffe ersetzt werden.

Allerdings ist die Energiebilanz von biologisch erzeugten Polymeren nach wie vor strittig. Weiterhin tragen die erforderlichen Düngemittel zu einer zusätzlichen Belastung des Grundwassers mit Nitraten bei. Die Umstellung aller petrochemischen Kunststoffe auf solche aus biologischer Basis würde auch kaum zur Schonung der Erdölreserven beitragen, da nur etwa 5 % des Erdöls zur Erzeugung von Kunststoffen benötigt wird.

Die Verwendung von biologisch abbaubaren Polymeren ist nicht zuletzt auch eine philosophische Frage. Ihre Eigenschaften erlauben nur Anwendungen mit relativ geringen Anforderungen, insbesondere hinsichtlich der maximalen Gebrauchstemperatur. Dem gegenüber stehen immer anspruchsvollere Anforderungen, etwa der Trend zum Leichtbau in der Fahrzeugindustrie. Der hieraus resultierende zunehmende Ersatz von Metallen durch Polymere erfordert jedoch wesentlich höherwertige Materialien. Gleichzeitig steigt deren Temperaturbelastung aufgrund von Maßnahmen zur Schalldämmung, insbesondere in kompakten oder besonders leistungsstarken Fahrzeugen. Technisch anspruchsvolle Teile oder solche, die eine hohe Temperaturbeständigkeit und/oder Langlebigkeit aufweisen sollen, erfordern also entsprechend leistungsfähige Basispolymere, die nicht biologisch abbaubar sind. Letztendlich muss sich der Konstrukteur die Frage stellen, auf welche Materialeigenschaften er zugunsten ökologischer Verträglichkeit verzichten kann.

Literatur

- 1 Bayer MaterialScience AG: "Green" raw materials for foam insulation, <http://www.pu-systems.bayermaterialscience.com>, aufgerufen am 19.8.2013
- 2 Bayer MaterialScience AG: Kunststoffe aus Treibhausgas, <http://www.bnc.bayer.de>, aufgerufen am 19.8.2013
- 3 Bundesministerium für Bildung und Forschung: CO₂: Vom Klimakiller zum Rohstoff, Pressemitteilung vom 9.4.2013, <http://www.bmbf.de>, aufgerufen am 19.8.2013
- 4 Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Technische Biopolymere. München: Hanser 2009
- 5 European Bioplastics, <http://en.european-bioplastics.org>, aufgerufen am 19.8.2013
- 6 Evonik Industries AG: Alternativer Rohstoff für Polyamid 12, <http://corporate.evonik.de>, aufgerufen am 19.8.2013
- 7 Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI, <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-de/>, aufgerufen am 25.8.2013
- 8 Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.: Kunststoffe – Eigenschaften, Brandverhalten, Brandgefahren. Köln: VdS Schadenverhütung 2000
- 9 Harvard University, Wyss Institute: Inspired by Insect Cuticle, <http://wyss.harvard.edu>, aufgerufen am 19.8.2013
- 10 Hellerich, W.; Harsch, G.; Haenle, S.: Werkstoffführer Kunststoffe. München: Hanser 2004
- 11 Kaiser, W.: Kunststoffchemie für Ingenieure. München: Hanser 2006
- 12 Lanxess AG: First production of bio-based polybutylene terephthalate (PBT), <http://www.lanxess.com>, aufgerufen am 19.8.2013
- 13 Lanxess AG: LANXESS to produce first bio-based EPDM rubber in the world, <http://www.lanxess.com>, aufgerufen am 19.8.2013
- 14 RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik: Dream Production – Technische Erschließung von CO₂ als Synthesebaustein für Polymere, <http://www.ltt.rwth-aachen.de>, aufgerufen am 19.8.2013
- 15 Saechtling, H.-J.: Kunststoff-Taschenbuch. München: Hanser 2007
- 16 Siemens, AG: Nachhaltiger Kunststoff mit CO₂, <http://www.siemens.com>, aufgerufen am 26.7.2013