

KUN 2.3 Kunststoffrecycling

Der schlechte Ruf von Kunststoffen als Materialien mit hoher Umweltbelastung konnte durch Umsetzung eines konsequenten Abfallrecyclings und durch Denken in Werkstoffkreisläufen in den neunziger Jahren ins Positive gekehrt werden. Betrachtet man die gesamte Wertschöpfungskette eines Produktes unter Berücksichtigung aller Umwelteinflüsse, wie Energie- und Ressourcennutzung, Klimaveränderung, Wasser- und Bodenschädigung sowie Abfallerzeugung und -beseitigung, schneiden Kunststoffe vielfach günstiger ab als einige konkurrierende Materialien wie Hölzer, Gläser oder Metalle.

Dies hängt mit den besonderen Eigenschaften von Kunststoffen zusammen, durch die Gewichtsreduzierungen oder die Integration vieler Funktionen in einem Bauteil ermöglicht werden (z. B. durch Schnapphaken ^{FUE 1.2}). Eine Optimierung der Energie- und Ressourcennutzung beim Transport, in der Produktion und Konstruktion ist vor allem mit Kunststoffen möglich.

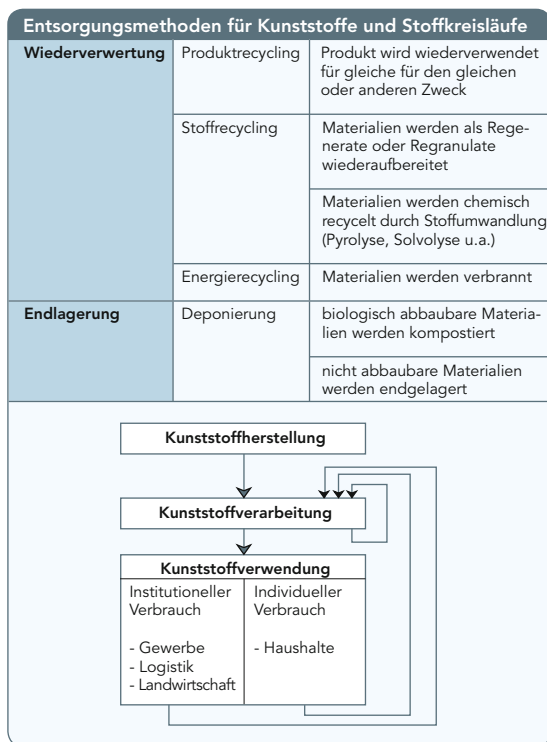


Abb.18: nach [40]

Darüber hinaus lassen sich Kunststoffe auf vielfältige Weise der Wiederverwertung zuführen. An erster Stelle ist die erneute Verwendung einzelner Bauteile oder Produktgruppen zu nennen (z. B. Pfandflaschen oder Getränkekästen in der Lebensmittelindustrie). Die zweite Stufe sieht das Recycling von Abfällen vor. Die letzte Möglichkeit der Verwertung von Kunststoffabfällen bildet die Verbrennung mit dem Ziel der Energiegewinnung. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass nur etwa 5% der Weltölproduktion zur Kunststoffherstellung verwendet und fast 90% direkt zur Energiegewinnung verfeuert werden.

Heizwerte verschiedener Kunststoffarten sind in nachfolgender Tabelle in einer vergleichenden Gegenüberstellung zu konventionell zur Energiegewinnung eingesetzten Werkstoffen dargestellt.

Kunststoffsorten, Brennstoffe und Heizwerte		
Polymere (Auswahl)	Brennstoff (Beispiel)	Heizwert
ABS, ASA, EVA, Olefinkautschuk, Polyolefine, PS	Benzin, Heizöl, Erdgas	> 10 kWh/kg
A/MMA, LCP, PA, PBT, PC, PEC, PEEST, PEI, PPS, PPSU, PPT, PVAL	Steinkohle, Heizöl (leicht)	> 7...10 kWh/kg
CSF, PBI, PES, PET, PUR, PVC, Stärke, Zellulose	Papier, Holz, Braunkohle	> 4...7 kWh/kg
E/TFE, PVC-C, MF, UF, VDC/VVC, VF	Rohbraunkohle, Sägespäne	> 1,5...4 kWh/kg
FEP, PCTFE, PFA	(keine)	< 1,5 kWh/kg

Abb.19: nach [40]

Beim Kunststoffrecycling unterscheidet man zwischen der Umschmelzung von Abfällen thermoplastischer Werkstoffe in Kunststoffgranulate und der chemischen Stoffumwandlung in deren Grundbestandteile. Recyclatgranulate können den Produktionsprozessen erneut zugeführt werden. Diese Form der Werkstoffwiederverwendung ist jedoch auf thermoplastische Kunststoffe beschränkt, da die Plastifizierung unter Wärmezufuhr leicht möglich ist. Elastomere und Duroplaste können durch Umschmelzen nicht aufbereitet werden. Hier wird auf die chemische Stoffumwandlung verwiesen. Außerdem können Duroplastrecyclate zerkleinert und als Füllstoffe der Wiederverarbeitung zugeführt werden.

Die Qualität des Kunststoffrecyclats und die Möglichkeit zur Rückführung in den Produktionsprozess werden vor allem durch die sortenreine Trennung des Abfalls bestimmt. Eine Vermischung verschiedener Kunststoffsorten macht die Wiederverwendung lediglich in Form von Polymerblends ^{KUN 4.1.13} möglich. Die Entwicklung neuer Aufbereitungsverfahren bietet in der jüngeren Vergangenheit aber auch die Möglichkeit, nicht getrennte Abfälle aus Kunststoffen, Papier, Holz und Metallen zu dickwandigen Produkten wie Bänken, Pfählen, Pfosten oder Spielplatzgeräten zu verarbeiten. Die Werkstoffabfälle werden dafür grob vorsortiert, zerkleinert und in einem Walzenextruder je nach Bestandteilen bei Temperaturen zwischen 140 °C und 180 °C zu einer teigigen Masse plastifiziert. Diese lässt sich in Werkzeugformen abkühlen. Es können Bauteile in den unterschiedlichsten Formgeometrien hergestellt werden (Lefteri 2001).



Bild: Verbundschaum mit Elastoflex® W Bindemittelsystemen: klein gehäckselter Schaum (u.a. aus Schnittverlusten aus der Schaumfertigung) wird wieder zu Formteilen verpresst./ Hersteller und Fotos: BASF Polyurethanes GmbH

Zur chemischen Stoffumwandlung von Kunststoffabfällen kommen die Verfahren *Hydrolyse* und *Pyrolyse* zur Anwendung. Innerhalb des Hydrolyseprozesses werden unter Wasserdampf Schaumstoffe oder geschäumte Bauteile aus Polyurethan sowie Bodenbeläge, technische Teile oder Textilien aus Polyamid und Polyester in ihre Ausgangsprodukte zurückgeführt.

Durch *Pyrolyse* werden Kunststoffabfälle unter Sauerstoffabschluss bei Temperaturen zwischen 400 °C und 800 °C in die petrochemischen Bestandteile zerlegt. Es entsteht ein hochreines Heizgas, das im Haushalt oder zur Beheizung von Wohnräumen verwendet werden kann. Der Heizwert von Pyrolyseprodukten ist höher als bei einer einfachen Verbrennung von Kunststoffabfällen in einer Müllverbrennungsanlage.

Im Zusammenhang mit der Verwertung von Kunststoffabfällen bleibt zu erwähnen, dass seit einigen Jahren an der Entwicklung von *Biokunststoffen* gearbeitet wird, die in natürlicher Umgebung kompostiert werden können. Man verspricht sich von diesen Materialien ganz neue ökologische Entsorgungsmöglichkeiten. Die Vision eines geschlossenen Stoff- und CO₂-Kreislaufs scheint mit diesen neuen Entwicklungsansätzen möglich.



Bild: Der Bürostuhl der italienischen Firma Marconi S.A.S. wurde zum »Kunststoff-Recycling-Produkt des Jahres« gekürt. Das Besondere an dem Bürostuhl: Alle innen liegenden Konstruktionsteile sind vollständig aus Recyclingkunststoff gefertigt. Sie stammen aus Verpackungen, die Verbraucher in der »Gelben Tonne« oder dem »Gelben Sack« gesammelt haben. Der Fuß des Stuhls besteht komplett aus recyceltem glasfaserverstärktem Polyamid (PA). Das Produkt kann vollständig wiederverwertet werden./ Foto: © Marconi S.A.S.



Bild: PET-Flaschen aus automatischer Wertstoffsartierung – Der Markt für Verpackungen aus Polyethylenterephthalat wächst und damit auch der Bedarf an hochwertigen Verwertungsverfahren./ Foto: Thomas Mayer, © Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH

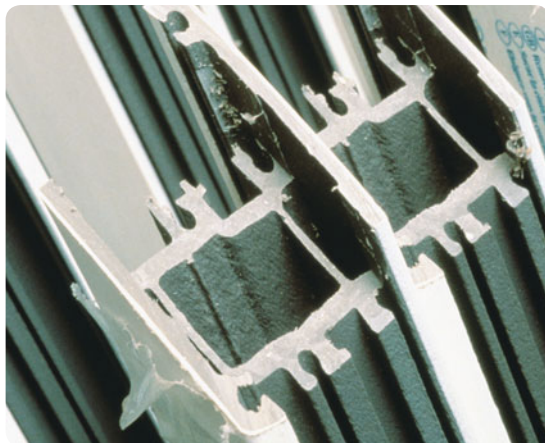


Bild: Recyclingkunststoffe können für zahlreiche Bauelemente (z. B. Profile für Fensterrahmen, Plattenwerkstoffe) eingesetzt werden. Die Recyclingprodukte genügen den hohen deutschen Qualitätsanforderungen./ Foto: Thomas Mayer, © Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH

KUN 3 Kunststoffgerechte Konstruktion

Auf Grund der besonderen Eigenschaften polymerer Werkstoffe bei der Verarbeitung lassen sich folgende Hauptregeln für die fertigungs-, werkstoff- und beanspruchungsgerechte Bauteilkonstruktion zusammenfassen. Die Hinweise sind hinsichtlich der wichtigsten Verarbeitungstechniken Spritzgießen, Pressen und Blasformen geordnet (Bonten 2003):

Kunststoffgerechte Konstruktion		
Regel	Zweck	Verfahren
geringe Wandstärken (abhängig von Fließfähigkeit des Kunststoffs)	schnellere Aushärtung und damit geringe Zykluszeit	S, P
konstante Wandstärken (Vermeidung von Masseanhäufung)	Vermeidung von Verzug und Lunkern (durch gleichmäßige Abkühlung und Schwindung)	S, P, B
Radien an Ecken und Kanten	gute Entformung, guter Schmelzfluss (bessere Ausformung, Verringerung von Kerbspannungen)	S, P, B
fertigungsgerechte Rippen	Vermeidung von Einfallstellen auf der Gegenseite	S, P
fertigungsgerechte Entformungsschrägen	gute Entformbarkeit, Oberflächengüte	S, P, B
Hinterschnitte vermeiden	Werkzeugkosten nicht unnötig erhöhen	S, P (B)
Anspritzpunkt günstig positionieren (wenn möglich nicht auf Sichtflächen)	günstige Fließwege, Vermeidung bzw. Minimierung von Bindenähten	S, B
Trennfugen günstig positionieren	optisch günstig gestalten, Werkzeugkonzept vereinfachen	S, P, B
Verringerung bzw. Vermeidung von Nacharbeit	Kosten reduzieren	S, P, B
ebene Flächen (großflächig oder dünnwandig) vermeiden	Vermeidung von Verzug bzw. Verwerfungen	B

S = Spritzgießen (behälter- und gehäuseartige, flächige, komplexe Produkte)
P = Pressformen (eher flächige Produkte)
B = Blasformen (behälterartige Produkte, Hohlkörper)

Abb.20

Werkstoffgerechte Gestaltung 1/ Kunststoff

Vermeidung von Winkelverzug

1 Sollform

Werkzeug
zweiseitige Kontaktfläche zum Werkzeug (schnellere Abkühlung)
keine Kontaktfläche zum Werkzeug (langsame Abkühlung)
einseitige Kontaktfläche zum Werkzeug (normale Abkühlung)

Durch die unterschiedliche Abkühlung in den links gezeigten Bereichen verzieht sich das Bauteil durch die zeitlich versetzte Schwindung des Materials. In diesem Beispiel verkleinert sich der Winkel innen. Weiterhin können im Eckbereich durch die Massenansammlung auch Lunker entstehen.

Abhilfe:
- ausgleichende Temperierung der Werkzeuge in den kritischen Bereichen
- Massenanhäufung im Eckbereich verringern

2 Istform

Winkelverkleinerung
Soll-Form
Ist-Form

$d_2 \leq d_1$

ungünstig **günstig**

Vermeidung von Verwerfungen

1 Sollform

mögliche Verwerfung eines ebenen Formteils nach Entformung

2 Istform

Abhilfe: bessere Formstabilität durch Verwendung versteifender Geometrien:
- Sicken
- gewölbte Oberflächen

ungünstig **günstig**

Abb.21: nach [4, 11, 14, 28]



Bild: Kunststoffrippen auf der Innenseite.



Bild: Einfallstellen auf der Außenseite. Dieses Bauteil wird anschließend mit einem weiteren, weichen Material umspritzt, so dass die Einfallstellen kaschiert werden.

Werkstoffgerechte Gestaltung 2/ Kunststoff

Volumen sparen durch Verrippung

Kreuzungen (Massenanhäufungen) bei Rippen vermeiden

ungünstig **günstig** **günstig**

Anbindung von Einschraubaugen spritzgussgerecht auslegen

Einfallstellen

ungünstig **günstig** **günstig**

Einfallstellen bei Rippen vermeiden bzw. gestalterisch berücksichtigen

ungünstig **günstig** **günstig** **günstig** **günstig**

- ungleichmäßige Einfallstellen auf der gegenüber liegenden Seite der Rippen
- Kaschieren der Einfallstellen durch bewusst gestaltete Zierripen
- Verwendung von kleineren, dünneren Rippen in höherer Anzahl
- Kaschieren der Einfallstellen durch bewusst gestaltete Zierrippen
- Übergang reduzieren Hinterschnitt bzw. Entformung beachten

s $0,3 S$ $1 \dots 1,5 S$

Weiterhin kann man Einfallstellen bedingt durch Verwendung von Oberflächenstrukturen (z.B. Erodier- oder Ätzstruktur) kaschieren

Massenanhäufung bei Einlegeteilen vermeiden

Massenanhäufung
Einlegeteil

ungünstig **günstig** **günstig**

Abb.22: nach [4, 11, 14, 28]



Anguss

Der Anguss ist die Stelle, an der die Polymerschmelze unter hohem Druck in die Werkzeugkavität geleitet wird. Durch seine Positionierung lässt sich die Fließrichtung der Schmelze beeinflussen. Da der Anguss nicht zum eigentlichen Bauteil gehört, wird der überstehende Kanal anschließend entfernt.



Einfallstellen

Aufgrund unterschiedlicher Abkühlungsgeschwindigkeiten können an Stellen mit starker Materialanhäufung (z.B. an Kreuzungspunkten von Verstärkungsrippen) Einfallstellen auf der Rückseite entstehen.



Hinterschnitt

Mit Hinterschnitt wird eine besondere Formteilgeometrie bezeichnet, die sich ohne Schieber oder Kerne nicht entformen lässt. Je mehr Hinterschnitte ein Bauteil enthält, desto komplexer und kostenintensiver ist das Werkzeug zu seiner Herstellung.



Bild: Versteifungsrippen auf der Bauteilunterseite vermeiden Materialanhäufungen./ Hersteller: Froli

Zwangsentformung

Die Möglichkeit zur Zwangsentformung eines Werkstücks mit Hinterschnitt ergibt sich insbesondere dann, wenn ein elastischer Werkstoff verwendet wird.



Bild: Kunststoffteile werden nach dem Spritzgießen mit Auswerfern aus der Spritzgießform geworfen. Die Auswerfer sollten nicht auf sichtbare Flächen ansetzen, da diese dort kreisrunde Abdruckstellen hinterlassen./ Hersteller: Froli



Entgraten

ist die Bezeichnung für das Entfernen unsauberer oder scharfer Kanten aus optischen und sicherheitstechnischen Gründen. Es kommen sowohl mechanische, thermische als auch elektrochemische Techniken zur Anwendung.



Bild: Thermisches Entgraten eines Kunststoffbauteils./ Foto: Heraeus, Hanau



Bild: Sichtflächen auf Kunststoffteilen sind meist mit einer Struktur versehen. Auf den nicht sichtbaren Oberflächen können Frässpuren sichtbar bleiben, um die Kosten des Formbaus gering zu halten.



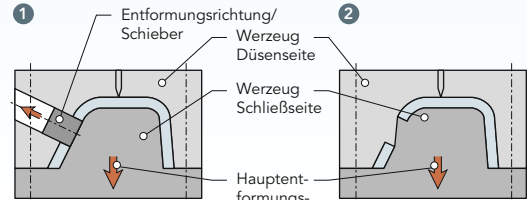
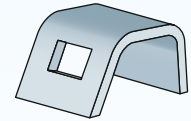
Bild: Mit einfachen Spritzgießwerkzeugen können Schnapphaken zur Verbindung von Bauteilen gefertigt werden. Der Hinterschnitt im Schnapphaken wird durch eine Öffnung ermöglicht, durch die das Werkzeug (»Schieber«) den Haken formen kann./ Beispielteile: Froli

Werkstoffgerechte Gestaltung 3/ Kunststoff

Vermeidung von Hinterschnitten im Werkzeug/ Werkzeugkonstruktion vereinfachen

Schieber können u. U. durch günstige Positionierung der Werkzeugtrennung vermieden werden:

- Abbildung 1: mit Schieber
- Abbildung 2: ohne Schieber, geringere Werkzeugkosten

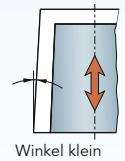


■ ungünstig / mit Schieber + günstig / ohne Schieber

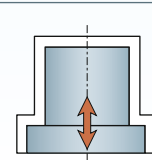
Entformungsschrägen im Werkzeug beachten

Je größer die Entformungsschrägen/ -winkel:

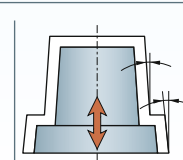
- desto besser die Oberflächengüte
- desto größer kann die Oberflächenstruktur sein
- desto kürzer die Zykluszeit (Abkühlzeit)
- desto geringer die Anzahl der notwendigen Auswerfer



Winkel klein



■ ungünstig



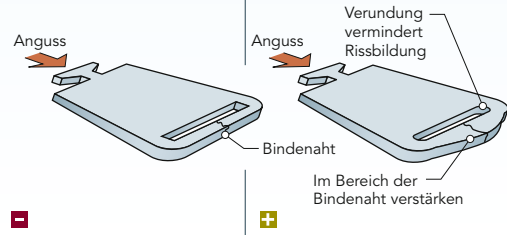
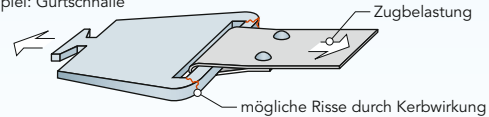
+ günstig

Winkel groß

Bindenähte vermeiden bzw. Bereiche mit Bindenähten beanspruchungsgerecht ausreichend dimensionieren

Bindenähte schwächen das Bauteil und sehen optisch nicht gut aus

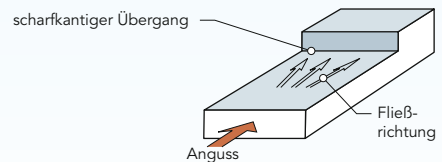
Beispiel: Gurtschnalle



■ +

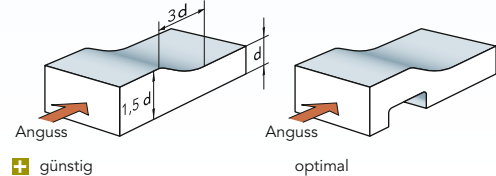
Werkstoffgerechte Gestaltung von Wanddickenübergängen

Querschnitte sollten sich in Fließrichtung nicht vergrößern, da sie nicht optimal bzw. fehlerhaft gefüllt werden (scharfe Übergänge bzw. Ecken verstärken diesen Effekt, siehe Abb.)



■

Anguss so legen, dass in Fließrichtung zuerst die großen Querschnitte gefüllt werden. Formübergänge sollten fließgerecht gestaltet sein, d. h. weiche Übergänge vorsehen und Massenanhäufungen vermeiden



+ günstig

optimal

Abb.23: nach [4, 11, 14, 28]

KUN 4

Vorstellung einzelner Kunststoffe

KUN 4.1

Thermoplaste

KUN 4.1.1

Thermoplaste – Polyethylen (PE)

Das Polyethylen ist eines der wichtigsten und gebräuchlichsten Polymere überhaupt (Shackelford 2005) und zählt zur Gruppe der **Polyolefine** (Ethylen, Propylen- und Butylenpolymere). Es wurde bereits 1898 vom Chemiker Hans von Pechstein entdeckt, konnte aber erst seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts wirtschaftlich hergestellt werden.

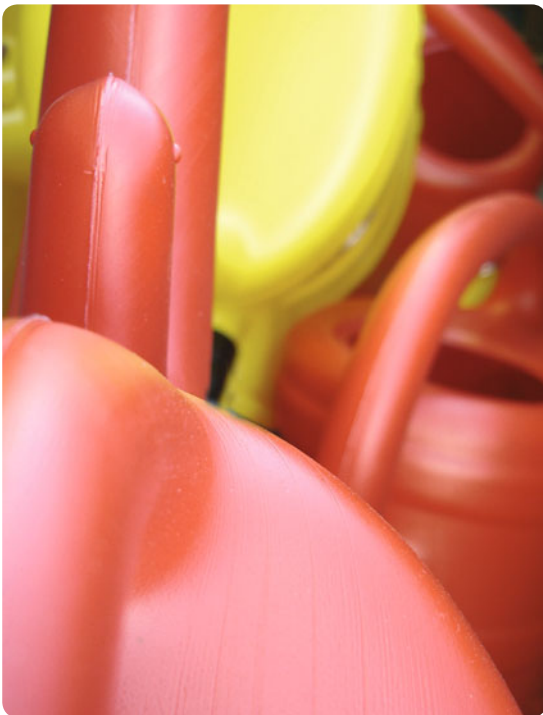


Bild: Gießkanne aus PE.

Eigenschaften

Der Kunststoff ist ein teilkristalliner Thermoplast mit einem hohen Anteil fadenförmiger Makromoleküle in einer kristallinen Struktur und regelmäßigen Anordnung. Dadurch weist der Werkstoff gute mechanische Eigenschaften auf, ist bis zu einer Temperatur von etwa 80 °C formstabil, relativ steif und besitzt eine hohe Reißdehnung. Polyethylen ist resistent gegen Wasser, Nahrungsmittelsäure und Säuren und lässt sich kostengünstig und vielfältig verwenden. Zudem verfügt der Kunststoff über sehr gute Elektroisolationseigenschaften. Grundsätzlich unterscheidet man Polyethylen hoher (**PE-HD**; High Density) und niedriger Dichte (**PE-LD**; Low Density). Die mechanischen Eigenschaften verbessern sich mit steigender Dichte und höherem Kristallanteil. Ungefärbtes Polyethylen (PE-HD) ist milchig-weiß und matt. Polyethylen (PE-LD) ist transparent.

Verwendung

Die 1949 entwickelte Tupperware® zur wasserundurchlässigen Aufbewahrung von Lebensmitteln ist eine in der breiten Bevölkerung bekannte Anwendung von Polyethylen. Typische Bauteile aus PE-HD sind des Weiteren Fässer, Flaschen, Verschlusskappen, Getränkekästen, Eimer oder Abwasserrohre. Polyethylen niedriger Dichte wird vor allem zur Herstellung von Schrumpffolien für Verpackungen, Tuben, Säcken, Tragetaschen oder Abdeckfolien verwendet. Für Anwendungen im elektrischen Bereich (z. B. Starkstromleitungen) wird der Werkstoff auf chemischem Weg oder unter Einsatz von Strahlungen stärker vernetzt (**PE-X**). Teilkristallines Polyethylen kann polarisiert werden und piezoelektrische Funktionen aufweisen. Diese werden zum Beispiel für Sensoren benötigt.

Verarbeitung

Polyethylen lässt sich sehr einfach verarbeiten. Die üblichen Formgebungsverfahren sind das Spritzgießen und Extrudieren sowie das Vakuum- und Blasformen. Die Biegebarkeit verbessert sich mit steigender Dichte. PE lässt sich zerspanend bearbeiten, wobei wegen der Gefahr der Überhitzung auf eine schnelle Wärmeabfuhr zu achten ist. Der Werkstoff weist eine sehr niedrige Oberflächenenergie auf und kann deshalb erst nach Vorbehandlung (Sandstrahlen, Beflammen oder Behandlung mit Chromschwefelsäure) bedruckt oder beklebt werden.

Zum Schweißen eignen sich Warmgas-, Reibungs- und Heizelementeschweißen. Daher wird auf Klebeverbindungen in aller Regel verzichtet. Reaktionskleber auf Epoxi- oder Cyanacrylatbasis sind aber dennoch vorhanden (Sprenger, Struhk 2004). PE-LD eignet sich als Beschichtungsmaterial für Rohre, Kühlschrankschalen und Spülmaschinenteile. Aufgebracht wird das Material durch Wirbelsintern bei etwa 220 °C (Hellerich, Harsch, Haenle 2001).

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Polyethylen ist ein preiswerter synthetischer Werkstoff und als Granulat oder Pulver sowie in Form von Platten, Rohren, Stäben, Blöcken oder als Folienmaterial erhältlich.

Alternativmaterialien

PP, PS, PVC, ABS, SAN, Aluminiumfolien zur Verpackung von Lebensmitteln, EVOH, EVA



Bild: Flaschen aus PE./ 1983/
Design: Juris Mednis

KUN 4.1.2**Thermoplaste – Polypropylen (PP)**

Wie Polyethylen gehört auch das Polypropylen mit seinen thermoplastischen Eigenschaften zur Gruppe der Polyolefine. Seine Produktion gelang erstmals 1954 durch das Unternehmen Montecatini. Es wurde 1957 von der Hoechst AG auf den Markt gebracht. Giulio Natta und Karl Ziegler erhielten 1963 für Ihre Entdeckungen auf dem Gebiet der produktionstechnischen Herstellung der Polyolefine PP und PE den Nobelpreis für Chemie (Emsley 2006).

Eigenschaften

Polypropylen gilt mit einer Dichte von $0,9 \text{ g/cm}^3$ als leichtester aller synthetischen Werkstoffe. Durch den großen Anteil kristalliner Struktur (60–70%) weist der Kunststoff eine hohe Steifigkeit, Festigkeit und Härte auf, ist sehr zäh und etwa bis zu einer Temperatur von 110°C formstabil. Polypropylen ist der härteste aller Polyolefinpolymere (PE, PP, PVC). Es besitzt eine hohe Hitzebeständigkeit, Kratz- und Reibungsfestigkeit. Durch seine gute Beständigkeit gegenüber Chemikalien, Säuren und Laugen ist kaum ein Unterschied zum Eigenschaftsprofil von Polyethylen auszumachen. Auch die elektrischen Eigenschaften sind mit denen von PE vergleichbar. Polypropylen hat eine weißlich-matte und halbdurchsichtige Erscheinung. Abfälle aus dem Werkstoff sind leicht zu recyceln.



Bilder: »SUPERLINE«
Messbecher aus PP mit
Siebdruck bedruckt./
Fotos oben:
EMSA GmbH



Bild: Trinkbecher aus PP.

Bilder: »LEO« Blumengießßer aus PP, stapelbar. Im Gegensatz zu der Gießkanne auf der vorherigen Seite benötigt diese wesentlich weniger Platz in der Lagerhaltung./ Fotos: EMSA GmbH

**Verwendung**

Polypropylen ist wärmebeständiger als Polyethylen. Deshalb wird es vorzugsweise zur Herstellung von Haushaltsgeräten, Innenteilen von Geschirrspülrern und kochfesten Platten für die Küche verwendet. Weitere Anwendungsbeispiele sind Spielzeug, Koffer, Flaschenverschlüsse, Schuhabsätze oder Kassettenhalterungen. Kunststoffteile im Innenraum von Automobilen gehören ebenso zum Gebrauchsspektrum des Werkstoffs wie Armaturen und Rohrleitungen für das Bauwesen. Auf Grund seiner guten Isolationseigenschaften wird der Werkstoff auch zur Ummantelung von Kabeln, Drähten und als Isolierfolie verwendet. Zudem findet Polypropylen in Möbeln und Sportartikeln häufig Verwendung. In den 90er Jahren überzeugten die von Authentics aus PP hergestellten Produkte durch ihre ästhetische Qualität, wodurch hochwertige Verwendungsmöglichkeiten erschlossen wurden. Außerdem hat sich der Werkstoff zur Herstellung von Teppichgrundgeweben, künstlichem Rasen und Sommerskipisten bewährt.

Verarbeitung

Die Bearbeitungsmethoden des Kunststoffes ähneln dem von Polyethylen. Eine spanlose Umformung von Polypropylen, z. B. durch Tiefziehen, ist bei Temperaturen zwischen $160\text{--}200^\circ\text{C}$ möglich (Schwarz 2002). Darüber hinaus können PP-Formteile mittels Spritzgießen, Extrudieren, Stranggießen oder Blasformen produziert werden. Die Verarbeitungstemperaturen liegen bei diesen urformenden Verfahren zwischen 220°C und 270°C . Die zerspanende Bearbeitung ist ebenso möglich. Wie bei Polyethylen muss die Oberfläche zum Bedrucken oder Kleben chemisch oder mechanisch vorbehandelt werden. Zum Fügen haben sich neben der Klebtechnik das Heizelement-, Warmgas- und Reibschweißen durchgesetzt. Polypropylen ist polierbar.

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Polypropylen zählt zu den kostengünstigen Massenkunststoffen. Granulate und Pulver aus PP sowie Halbzeuge in Form von Folien, Platten, Stangen, Profilen und Stangen sind auf dem Markt erhältlich.

Alternativmaterialien

PE, PS, PVC, ABS, SAN, Aluminiumfolien zur Verpackung von Lebensmitteln, EVOH

Bild: »CLIP & CLOSE« Frischhaltedose aus PP mit separater Silikondichtung./ Foto: EMSA GmbH



KUN 4.1.3 Thermoplaste – Polystyrol (PS)

Bereits 1835 entdeckte Eduard Simon das Prinzip der Polymerisation, als es ihm gelang, Styrol aus der Rinde des Styraxbaumes zu destillieren. Der Grundstein für die Entwicklung thermoplastischer Kunststoffe war gelegt. Die industrielle Produktion von Polystyrol begann in Deutschland im Jahr 1930 in den Werken der I.G.-Farben-Industrie in Ludwigshafen. Ein weiterer Meilenstein in der Entstehungsgeschichte des Werkstoffs ist die Entdeckung eines Aufschäumverfahrens von Polystyrol zu Styropor® im Jahr 1949. Die Verwendung von Polystyrolschaum bei der Bergung eines Frachters im Hafen von Kuwait im Jahre 1963 brachte Styropor® erstmals ins Rampenlicht. Der Durchbruch zur industriellen Nutzung war vollzogen (Kreutz, Scholte 2004).



Bild: Joghurtbecher aus PS.

Eigenschaften

Polystyrol eignet sich zur Herstellung qualitativ hochwertiger und glatt glänzender Oberflächen mit hoher chemischer Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten. Der Werkstoff ist hart und steif, aber auch spröde und schlagempfindlich. Er weist im Gegensatz zu den Polyolefinen PP und PE keinen kristallinen Anteil auf. Die Witterungsbeständigkeit des Kunststoffs ist als gering zu bewerten, weshalb sich der Werkstoff nicht für Außenanwendungen eignet. Polystyrol vergilbt. Zur Verbesserung der Eigenschaften von reinem PS, vor allem zur Beseitigung der Sprödigkeit, kann die Ausgangsmasse mit Zusätzen wie Butadien und/oder Acrylnitril gemischt werden. Es entstehen modifizierte Polystyrolsorten wie **Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)**, **Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymer (ABS)**, **Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Polymer (ASA)** und **schlagfestes Polystyrol (SB)** (Schaumburg 1997). Sie weisen im Vergleich zum Ausgangsmaterial eine höhere Festigkeit, Kratzbeständigkeit, Härte und Zähigkeit auf. PS-S ist ein relativ neues Styrolpolymer mit einem teilkristallinen Anteil, einer sehr hohen Wärmeformbeständigkeit und für die Elektroindustrie geeignetem Eigenschaftsprofil. Mit diesen besonderen Qualitäten tritt es in Konkurrenz zu anderen technischen Kunststoffen wie PBT oder PA (Hellerich, Harsch, Haenle 2001). Sie weisen im Vergleich zum Ausgangsmaterial eine höhere Festigkeit, Kratzbeständigkeit, Härte und Zähigkeit auf.

Styropor® ist geschäumtes Polystyrol mit geringer Dichte und Festigkeit aber sehr guten Wärmeisolationseigenschaften. Der Werkstoff reagiert sehr empfindlich auf mechanische Belastungen. Verschiedene Schäumverfahren haben sich entwickelt, mit denen

Styroporsorten ^{KUN 4.4} unterschiedlicher Dichtewerte hergestellt werden können:

- PS-Partikelschaum (15–50 kg/m³)
- Styrofoam-Extrusionsschaum (60–200 kg/m³)
- Strukturschaum (0,5–0,9 g/cm³)



Bild: PS-Schaum als Modellbaumaterial.

Verwendung

Joghurtbecher oder Wegwerfgeschirr sind Beispiele für die Verwendung von Polystyrol, die jedermann bekannt sind. Wegen der geringen Kosten werden viele Massenartikel bis zu einem Gewicht von 10 kg aus dem Werkstoff hergestellt. Hier sind Spielzeuge, Haushaltsgegenstände, Blumentöpfe, Schreibgeräte, Uhren, Verpackungen für Medikamente und Kosmetika sowie Bauteile mit hoch glänzenden Oberflächen zu nennen.

Die modifizierten schlag- und wärmebeständigeren Polystyrene ABS und SAN kommen vor allem für höher belastete Produkte und Bauteile zur Anwendung. Beispiele sind Telefongehäuse, Kühlschranksätze, Staubsaugergehäuse, Wandverkleidungen, Kassettenhüllen, Stabmixer oder Gartentische. Ein prominentes Beispiel für den Einsatz von ABS sind Lego®-Bausteine.

PS-Schaum/ Styropor® wird als Formteil oder Flockenmaterial vor allem zur Verpackung stoßempfindlicher Güter (z. B. Elektronikgeräte) verwendet. Außerdem finden PS-Schaumkugeln als Füllmaterial für Möbel (z. B. Sitzsäcke) Anwendung. PS-Hartschaumplatten dienen zur Anfertigung großvolumiger Anschauungs- und Volumenmodelle im Architekturbereich und werden auf Grund ihrer guten Isolationseigenschaften zur Schall- und Wärmedämmung im Baugewerbe eingesetzt. Außerdem wird PS-Schaum auf Grund seiner dämmenden Fähigkeiten im Fahrzeugbau verwendet. Als umweltfreundlicher und natürlich abbaubarer Ersatzwerkstoff für PS-Schaum wurde vor einigen Jahren Papierschaum ^{PAP 5.5} entwickelt und erfolgreich im Markt eingeführt.

Bild: Modellflugzeug aus PS-Schaum.



Bild: Becher aus PS./
Foto: PAPSTAR





Bild: Schubladen und Kühlschranksätze aus PS./
Foto: BASF SE

Verarbeitung

Reines Polystyrol lässt sich sehr gut spritzgießen. Auf Grund von Orientierungen in Richtung der Fließrichtung kann allerdings eine Beeinträchtigung der mechanischen Festigkeit quer dazu auftreten. Die modifizierten Sorten werden vorzugsweise mittels Extrusion zu Profilen oder Plattenmaterial konfektioniert. Eine spanlose Umformung zu Becher- und Tellerformaten ist bei Temperaturen zwischen 150°C und 200°C im Tiefziehverfahren und Thermoformen möglich. Dünnwandige Bauteilgeometrien werden spritz- oder extrusiongeblasen. Alle Polystyrensorten können zerspanend bearbeitet und zugeschnitten werden. Klebeverbindungen zwischen PS-Oberflächen sind mit Lösungsmittelklebstoffen wie Dichlormethan herstellbar. Bauteile aus Polystyrol können mit anderen Materialien durch Polymerisations- (z. B. Cyanacrylatkleber) oder Kontaktklebstoffen gefügt werden. Polyurethankleber stehen darüber hinaus für Bauteile aus ABS zur Verfügung. Wegen der sehr guten Klebbarkeit der Polystyrene wird nur in Ausnahmefällen auf Ultraschallschweißen zurückgegriffen. Die Oberflächenqualität des Werkstoffs kann auf einfache Weise durch Polieren oder Schleifen gewährleistet werden. Sieb- und Tampondruck sind für Polystyrene anwendbar. Außerdem können ABS-Oberflächen galvanisch mit Metall beschichtet werden.

Hartschaumplatten aus Polystyrol lassen sich mit einem Cutter oder einer Band-, Kreis- oder Thermo-*säge* ⁴ *TRE 1.4, TRE 2.3* bearbeiten. Unebenheiten und Ausbrüche werden im Allgemeinen mit Spachtelmasse beseitigt. Eine Oberflächenendbearbeitung ist mit mittelfeinem Schleifpapier möglich. Styropor reagiert empfindlich auf Lösungsmittel, so dass zum Kleben von Werkstoffoberflächen aus geschäumtem Polystyrol Dispersionsklebstoffe (Styroporkleber) oder Kontaktklebstoffe auf Kautschukbasis empfohlen werden.

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Polystyrol zählt zu den preiswertesten Kunststoffen. Es ist als Granulat zur Weiterverarbeitung im Spritzguss- und Extrusionsverfahren erhältlich. Darüber hinaus werden Halbzeuge und Profile (Rohre, Stäbe, Blöcke, Platten, Folien) vertrieben. Styropor-Hartschaumplatten sind mit Dichten zwischen 20 kg/m³ und 200 kg/m³ auf dem Markt erhältlich.

Alternativmaterialien

PP, PE-HD, PA, PBT, PVC, Papierschaum als Ersatz für Styropor

KUN 4.1.4

Thermoplaste – Polycarbonat (PC)

Die Bayer AG meldete den von Hermann Schnell erstmals am 28. Mai 1953 hergestellten Werkstoff Polycarbonat noch im gleichen Jahr zum Patent an und vertreibt das seit 1956 großtechnisch produzierte Material unter dem Handelsnamen Makrolon®. Zeitgleich zu den Arbeiten von Schnell wurde der Werkstoff bei General Electric eher zufällig als zähe Masse in einer Vorratsflasche entdeckt und kam 1958 unter der Marke Lexan® auf den Markt.

Eigenschaften

Polycarbonate sind amorphe Thermoplaste mit einer auch bei großen Materialdicken lichtdurchlässigen, glasklaren Transparenz und guten optischen Qualitäten. Sie besitzen eine hohe Schlagfestigkeit und sehr gute Formstabilität in einem weiten Temperaturspektrum. Darüber hinaus weist der Werkstoff gute elektrische Isolationseigenschaften und eine gute Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen und Wärme auf. Ein nahezu gleich bleibendes Eigenschaftsprofil, auch bei sich verändernden Temperaturen, ermöglicht den Einsatz des Werkstoffs von -150 °C bis +135 °C. Die guten mechanischen Eigenschaften können für hohe Beanspruchungen durch Einbetten von Fasern (z. B. Glasfasern) verbessert werden. Faserverstärkte Varianten können teilweise bis zu einer Temperatur von 145 °C verwendet werden.



Bild: CDs aus Polycarbonat.

Verwendung

Klares Polycarbonat mit einer Lichtdurchlässigkeit von 80–90% wird für unzerbrechliche Verglasungen von Wohnwagen und landwirtschaftlichen Fahrzeugen, Schutzhelme, Sportbrillen, Visiere oder Sicherheitsgläser verwendet. Wegen seiner guten Lebensmittelverträglichkeit kommt der Werkstoff auch zur Herstellung von Nahrungsmittelverpackungen zur Anwendung. Ein großer Teil der Produktion von Polycarbonat geht in die Herstellung von CDs und DVDs.

Weitere anschauliche Anwendungsfelder sind Schreib- und Zeichengeräte, Staubsaugergehäuse, Küchengeräte, Füllfederhalter und optische Geräte.

Die guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften machen Polycarbonat für Radio- und Fernsehgehäuse und als Konstruktionswerkstoff für die Elektroindustrie interessant (z. B. Trafogehäuse, Schalter, Stecker, Kontaktleisten, Leuchtstoffröhrensockel). In der Lichttechnik wird PC als Abdeckung für Leuchten und Blinker verwendet. Aus dem Werkstoff werden auch Schrumpf- und Isolierfolien sowie Klebebänder gefertigt. Wegen der einfachen Verarbeitbarkeit wird der Werkstoff auch im Modellbau eingesetzt. Bautechnische Anwendungen sind Brückenbrüstungen, Verglasungen im Dachbereich oder Panzergläser. In hochwertigen Automobilen sparen leichte Scheiben aus Polycarbonat Energie und sorgen für mehr Fahrdynamik. Die erste vollständig transparente Fahrzeugkarosserie wurde 2007 für das ConceptCar eXaxis entwickelt. Auch Dachelemente olympischer Sportstätten in Peking wurden mit Polycarbonatplatten ausgestattet.



Bild: eXaxis ConceptCar./ Rinspeed AG, Frank M. Rinderknecht

Verarbeitung

Polycarbonat kann bei Temperaturen zwischen 250 °C und 300 °C durch Spritzgießen oder Extrusion formgebend verarbeitet werden (Keim 2006). Das Vakuumformen von Folien ist bei etwa 180 °C möglich. Hohlkörper werden durch Blasformen erzeugt. Der Werkstoff ist einfach zu zerspanen und kann mit Sägen zugeschnitten werden. Warmumformen ist zwischen 180 °C und 210 °C möglich. Fügeverbindungen werden zwischen löslichen Kunststoffen mit Lösungsmittelklebstoffen wie Dichlormethan hergestellt. Für Paarungen mit nicht löslichen Materialien (z. B. Metall, Stein, Keramik) steht Silikonkautschuk zur Verfügung. Polycarbonate können auch geschweißt werden (Heizelementeschweißen). Für größere Teile wird vorzugsweise Warmgasschweißen angewendet. PC-Werkstoffe sind metallisierbar und können sowohl transparent als auch deckend gefärbt werden.

Handelsformen

Halbzeuge können in Form von Rohren, Stangen, Profilen und Folien bezogen werden. Platten werden in der Regel mit Schutzfolien geliefert.

Alternativmaterialien

PET, PBT, POM, PMMA (Acrylglas)



Bild: Teesieb aus PC./
Hersteller: Bodum

KUN 4.1.5 Thermoplaste – Polyvinylchlorid (PVC)

Bevor 1935 die Massenproduktion von Polyvinylchlorid in den Werken der I.G.-Farben-Industrie in Wolfen und Bitterfeld aufgenommen wurde, waren die ersten Produktionsanlagen schon Ende der 20er Jahre in den USA in Betrieb. Heute ist PVC hinter PE und PP der thermoplastische Kunststoff mit der drittgrößten Bedeutung. 2003 lag die weltweite PVC-Produktion bei 26.500.000 Tonnen, etwa ein Viertel des gesamten Kunststoffmarktes. Unzählige Zusatzstoffe und Additive machen PVC zu einem Allround-Werkstoff.

Eigenschaften

Die großen Produktionsmengen von Polyvinylchlorid sind zum einen auf die geringen Herstellungskosten zurückzuführen. Zum anderen verdankt der Werkstoff seine hohe Bedeutung seiner Funktion als Speicher- und Auffangmedium für Chlor. Polyvinylchloride sind amorphe Thermoplaste mit sehr guter chemischer Beständigkeit. PVC-Bauteile lassen sich glasklar ausführen und sowohl transparent als auch gedeckt einfärben. Im Vergleich zu anderen Massenkunststoffen ist PVC auf Grund des hohen Chlorgehalts schwer zu entflammen. Ursprünglich hart und spröde, wird die Zähigkeit des Werkstoffs mit Weichmachern variiert und auf den Anwendungsfall eingestellt (Peters, Struhk 2008).

Bild: Schwimmball aus PVC.



Die auf dem Markt erhältlichen Spezifikationen werden in *Hart-* und *Weich-PVC* unterteilt. Die harte Variante (*PVC-U* (unplasticized)) enthält keine Weichmacher und zeichnet sich durch hohe Festigkeit, Steifigkeit und Härte sowie eine hervorragende Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Substanzen aus. Die elektrischen Isolationseigenschaften übertreffen die der weichen Variante. Der Werkstoff ist bis zu einer Temperatur von 60°C einsetzbar. Bei tiefen Temperaturen ist mit Versprödung zu rechnen.

Kennwerte von PVC-U und PVC-P		
Eigenschaft	PVC-U	PVC-P
Dichte ρ [$10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1,38...1,39	1,20...1,35
Glastemperatur T_g [°C]	70...80	-5...-20
Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	0,170	0,151...0,174
Lin. Wärmeausdehnungskoeffizient α [10^{-6} K^{-1}]	70...80	200
Dauergebrauchstemperatur [°C]	65	60
Spez. Durchgangswiderstand ρ_D [$\Omega \cdot \text{cm}$]	1015	1011...1015
Oberflächenwiderstand R_0 [-]	13	13
Zugfestigkeit σ_v [MPa]	50...60	13...35
Bruchdehnung ϵ_B [%]	10...100	195...375
Elastizitätsmodul E_t [MPa]	2000...3000	2,9...37

Abb. 24: nach [25]

Das Einbringen von Weichmachern (z. B. Phthalate) verschafft PVC-P (plasticized) gummielastische Eigenschaften und vergrößert somit das Anwendungsspektrum für entsprechende Einsatzfälle (z. B. Schläuche, Luftmatratzen). Die Dämpfungswirkung des Materials ist sehr groß. Allerdings gehen mit der Erweiterung des Profils geringere thermische und chemische Beständigkeiten einher. Da Phthalate in Weich-PVC nicht fest eingebunden sind, dünnen sie aus und lösen sich beim Kontakt mit Flüssigkeiten oder Fetten. Sie stehen im Verdacht, Unfruchtbarkeit, Übergewicht und Diabetes hervorzurufen, und sind daher für Babyartikel und Kinderspielzeug verboten und für den Lebensmittelbereich gänzlich ungeeignet. Daher werden Mesamol oder Hexamol als phthalatfreie Weichmacher seit einiger Zeit verwendet. Durch Hautkontakt mit dem Ausgangswerkstoff Vinylchlorid in der Produktion und Einatmen giftiger Dämpfe, z. B. nach einem Brand, ergeben sich zudem gesundheitsschädliche Risiken. Eine Reihe von Weichmachern ziehen Hunde und Nagetieren an, so dass bei freiliegenden Elektrokabeln aus PVC-P im Haushalt oder im Motorraum langfristig mit Schäden zu rechnen ist.

Verwendung

Wegen der schweren Entflammbarkeit werden PVC-Werkstoffe vor allem im Baugewerbe für Fensterrahmen, Rollläden und Dachrinnen eingesetzt. Hart-PVC kommt darüber hinaus für Rohrleitungen, im Maschinen- und chemischen Apparatebau, in der Verpackungsindustrie und in der Foto- und Medizintechnik zur Anwendung. Außerdem wird es im Elektrobereich für Verteilerkästen und Kabelführungen eingesetzt. Typische Produktbeispiele der weichen Spezifikation PVC-P sind transparente Schläuche, Kabel- und Leitungsisolierungen, Dichtungen, Bodenbeläge, Kunstleder, Schwimmspielzeuge, Regenbekleidung, Sandalen, Badelatschen, Schutzhandschuhe oder Tischdecken im Haushalt. PVC-Folien werden in der Verpackungsindustrie eingesetzt und finden Anwendung im Foto-Bereich und in der Medizintechnik. »d-c-fix®« ist eine bekannte Marke für eine PVC-Dekorfolie im Möbelbereich.

Früher aus PVC hergestellte transparente Flaschen, Einwegbecher und Blisterverpackungen wurden weitestgehend durch PET ersetzt. Als Alternative für PVC-Fußbodenbeläge werden zunehmend Holz und Kork verwendet. Hartschäume aus PVC sind im Bootsbaubereich und für Rotorblättern von Windkraftanlagen in der Anwendung.

Verarbeitung

PVC-U kann spritzgegossen, extrudiert, geschäumt oder gesintert. Für Hohlkörper kommen außerdem das Blasformen und Tauchgießen in Frage. Die weiche PVC-Variante kann durch Flamm-spritzen, Tauchen und Streichen beschichtet werden. PVC-U lässt sich gut schäumen. Die spanlose Umformung von Hart-PVC ist bei Temperaturen von etwa 130 °C möglich (z. B. Biegen, Tiefziehen). Die Umformbarkeit bei Temperaturen über 140 °C ist stark eingeschränkt. Eine zerspannende Fertigung entfällt bei PVC-P völlig. PVC-U Bauteile lassen sich aber mit den konventionellen Techniken zerspannend bearbeiten. Dünne Folien können mit dem Cutter geschnitten werden. Ritzbrechen ist bei dickeren Platten möglich, da PVC-hart relativ kerbempfindlich ist (Peters, Struhk 2008). Polyvinylchloride sind sehr gut schweißbar (z. B. Warmgas-, Reib-, Ultraschallschweißen). Zum Kleben stehen Kunststoffkleber und spezielle Kontaktkleber zur Verfügung. Für PVC-PVC Paarungen eignen sich auch besondere Kleblacke. Klebverbindungen für technische Anwendungen zwischen PVC und einem anderen Werkstoff werden mit Lösungen von chloriertem PVC oder Zwei-Komponenten-Klebstoffen auf Polyester-, Polyurethan- oder Epoxidharzbasis erzeugt. Für kleinflächige Verbindungen kann auch ein Sekundenkleber Verwendung finden. PVC-Oberflächen lassen sich im Siebdruckverfahren bedrucken. Das Wirbelsintern [BES 4.4](#) wird gerne zur Beschichtung von Bauteilen mit PVC-Pulver angewendet.

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Den geringen Herstellkosten von Polyvinylchlorid stehen umweltbelastende Eigenschaften und somit Folgekosten für die Entsorgung gegenüber. Es sollte daher stets die Verwendung von Alternativmaterialien geprüft werden. PVC ist in Form von Platten, Profilen, Folien, Blöcken, Stangen und Hartschäumen erhältlich. PVC-P gibt es in vielfältigen Folienformaten.

Alternativmaterialien

PP, PE, PS-SB, EVA, PTFE, PET, PUR-Beschichtung für Textilien, Linoleum als Bodenbelag



Bild: Schlauch aus PVC mit Gewebeverstärkung.

KUN 4.1.6 Thermoplaste – Polyamid (PA)

Die Vorarbeiten zur Entdeckung des synthetischen Werkstoffs Polyamid gehen auf W. H. Carothers zurück, der 1929 eine Forschungsgruppe bei Du Pont de Nemours (USA) leitete. Bereits 1930 wurde eher zufällig ein synthetisches, seidenähnliches Fasermaterial entdeckt. Der patentrechtliche Schutz von Polyamid 6.6 erfolgte 1935. Die Markteinführung unter dem Markennamen Nylon® (PA66) im Jahr 1938 wurde von einer groß angelegten Werbekampagne in den USA begleitet. Innerhalb von 4 Tagen konnten 6 Millionen Paar Nylon-Strümpfe verkauft werden. In Deutschland wurde eine Lücke im Patent genutzt und der Werkstoff unter dem Namen Perlon® (PA6) auf den Markt gebracht.

PA 6.10

Das Polyamid 6.10 mit Markennamen Ultramid Balance geht zu gut 60% auf Sebacinsäure zurück, die aus Rizinusöl gewonnen wird. PA 6.10 weist eine relativ geringe Dichte auf, ist dimensionsstabil und hat eine gute Kallschlagzähigkeit.

Eigenschaften

Der Aufbau von Polyamidfasern ähnelt dem natürlicher Eiweißstoffe wie Seide ^{TEX 4.2.2.} Sie weisen allerdings bessere mechanische Eigenschaften und eine höhere Reiß- und Scheuerfestigkeit auf. Als Werkstoff ist Polyamid abriebfest, thermisch und chemisch beständig, lichtstabil und hält auch hohen Stoßbelastungen stand. Charakteristisch für das Material ist seine milchig-weiße Erscheinung. Wegen der Neigung zur Aufnahme von Wasser müssen Längenänderungen berücksichtigt werden. Die elektrischen Isolationswerte sind abhängig vom Wassergehalt. Für Anwendungen im Maschinenbau und in der Feinwerktechnik wurden die teilkristallinen Polyamide PA6, PA66, PA11, PA12 und PA610 entwickelt. Diese weisen auch bei tiefen Temperaturen eine gute Zähigkeit auf und können dynamisch hoch beansprucht werden. Auch unter Langzeitbeanspruchung zeigen Polyamide kaum Ermüdungserscheinungen. Herausragend ist das gute Dämpfungsvermögen der Werkstoffgruppe.

Verwendung

Auf Grund des hervorragenden Eigenschaftsprofils sind Polyamide als Leichtbau- und Konstruktionswerkstoffe in nahezu allen technischen Bereichen zu finden. Maschinenelemente wie Laufrollen, Zahnräder oder Gleitlager mit sehr leisen Laufeigenschaften werden aus dem Werkstoff hergestellt.

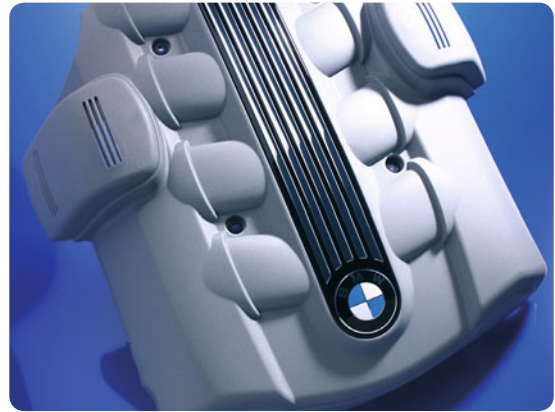


Bild: Mit ihrer zunehmenden Leistungsfähigkeit halten Kunststoffe immer stärker Einzug in Bereiche mit sehr hoher Temperaturbelastung, wo sie Anwendungen aus Metall ersetzen. Im Automobil-Motorraum treten Betriebstemperaturen von 180...200°C auf, wofür der Kunststoff Ultramid® A3WG10 entwickelt wurde, einen Compound der auf PA66 mit 50% Glasfasern basiert./ Foto: BASF SE

Eingesetzt im Motorraum bieten Polyamidbauteile Möglichkeiten zur Minderung des Fahrzeuggewichts. Präzisionsbauteile für den Elektronikbereich und in der Feinwerktechnik mit Isolationseigenschaften werden aus Polyamiden gefertigt. Die geringe Gas- und Dampfdurchlässigkeit macht den Werkstoff darüber hinaus für Lebensmittelverpackungen geeignet. Transparente Nylonfäden werden zu Dekorationszwecken verwendet. Ein bedeutendes Anwendungsgebiet für Polyamidfasern ist die Textilindustrie ^{TEX 4.4.1.} Weitere Verwendung finden Polyamidfasern als Puppenhaar, für Angelschnüre und Fischereinetze.

Verarbeitung

Polyamide sind teilkristalline Thermoplaste, die sehr gut spritzgegossen werden können. Profile entstehen nach Extrusion. Hohlkörper werden durch Blasformen erzeugt. Für großvolumige Tanks kommt auch das Rotationsformen bzw. der Schleuderguss zur Anwendung. Die zerspanende Bearbeitung durch Drehen oder Fräsen ist unkompliziert. Als umformende Verarbeitung ist das Strangpressen zu nennen. Das Kleben von Polyamidbauteilen ist schwierig. Zum Schweißen können das Warmgas- und Heizelementeschweißverfahren genutzt werden. Die Qualität einer Polyamidoberfläche lässt sich leicht mit feinem Schleifpapier optimieren. PA-Beschichtungen für metallische Bauteile zum Schutz gegen Korrosion werden mittels Wirbelsintern und Flamm-spritzen erzeugt. Bei einigen Polyamidsorten können Metallüberzüge galvanisch aufgebracht werden.

Alternativmaterialien

ABS, PP, PBT, POM

KUN 4.1.7

Thermoplaste – Polymethylmethacrylat (PMMA)

PMMA konnte zum ersten Mal 1933 durch den Chemiker Otto Röhm in Darmstadt hergestellt werden. Im Volksmund werden für den Kunststoff vor allem die Bezeichnung *Acrylglas* oder der Markenname *Plexiglas* verwendet. Zurückzuführen ist der Werkstoff auf Entdeckungen aus dem Jahr 1872. Seit seiner Promotion im Jahr 1901 war Röhm der Idee eines Gummiersatzes aus Kunststoff auf der Spur. Seine Forschungsleistungen wurden 1937 auf der Weltausstellung in Paris mit einer goldenen Medaille ausgezeichnet. Aktuell arbeiten Wissenschaftler an einer Möglichkeit, PMMA durch Enzyme aus Zucker oder Alkoholen zu erzeugen. In diesem Zusammenhang wurde eine Forschergruppe 2008 für den Evonik Forschungspreis nominiert.



Bild: Fahrradleuchte.

Eigenschaften

Polymethylmethacrylat (PMMA) lässt sich auf Grund seines Eigenschaftsprofils zwischen einer zähen und biegsamen Glassorte und einem steifen Kautschuk einordnen. Es ist lichtdurchlässig, hat eine hohe Brillanz und weist eine hervorragende Witterungsbeständigkeit gegenüber chemischen Einflüssen auf. Mit einer Dichte von $1,18 \text{ g/cm}^3$ ist Acrylglas nur halb so schwer wie normales Fensterglas, weshalb es sich für vielfältige Anwendungen im optischen Bereich hervorragend eignet. Zu beachten ist die Gefahr des Zerkratzens der Oberfläche. Vorteilhaft ist im Vergleich zu Glas das Fehlen scharfkantiger Splitter bei Bruch. Die Gebrauchstemperaturen reichen bis zu Werten von 65°C . PMMA-Sondervarianten können bis zu 95°C eingesetzt werden. Von Acrylgläsern gehen keine toxischen Gefahren aus. Sie sind daher für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen. Recycling ist möglich.

Verwendung

Wegen der hervorragenden optischen Eigenschaften und einer Lichtdurchlässigkeit von 92% eignet sich der Werkstoff zur Herstellung von Brillengläsern, Lupen, Projektoren, Prismen, Uhrgläsern und Linsen. Weitere typische Einsatzfelder sind Dachverglasungen, durchsichtige Rohrleitungen, Werbeschilder, Schreib- und Zeichengeräte. Aus dem Haushalts- und Sanitärbereich sind Schüsseln, Bestecke, Waschbecken, Duschkabinen oder Badewannen bekannt. Die guten elektrischen Eigenschaften werden für Leuchtenabdeckungen, Lampenfassungen oder Schalttafeln genutzt. Als Werkstoff für den Modellbau ist Acrylglas nicht mehr wegzudenken. Bei Musikinstrumenten wird PMMA zur Herstellung von Tasten verwendet. Außerdem ist Polymethylmethacrylat für Schutzverglasungen geeignet.

Verarbeitung

Die Verarbeitung von PMMA-Werkstoffen zu Formteilen kann durch Polymer- oder Spritzgießen, im Schleuderguss oder durch Extrusion erfolgen. Acrylglas lässt sich darüber hinaus mit allen zerspanenden Verfahren bearbeiten. Die Umformung von Plattenmaterial ist bei Temperaturen zwischen 130°C und 180°C möglich. PMMA ist sehr gut klebbar. Bei Verwendung von Polymerisationsklebstoffen auf Acrylatbasis entstehen nahezu unsichtbare Klebenähte. Leichte Kratzer können mit Polierpasten entfernt werden. Zur Beseitigung tiefer Kratzspuren empfiehlt sich die Verwendung wasserfesten Schleifpapiers unterschiedlicher Körnung (320-400-600-1.000).

Handelsformen

Niedermolekulare PMMA-Sorten sind als Pulver oder Granulat erhältlich und können gießtechnisch verarbeitet werden. Hochmolekulares Acrylglas ist nur als Halbzeug in Form von Platten, Blöcken, Rohren, Stangen oder Lichtleitfasern erhältlich.

Alternativmaterialien

Glas, PC, PS, PVC, PET

Bild: Schutzbrillengläser aus PMMA./ Hersteller: UVEX



KUN 4.1.8 Thermoplaste – Polyoxymethylen/ Polyacetal (POM)

Hinter der Abkürzung »POM« verbirgt sich der seit 1959 auf dem Markt befindliche, synthetische Werkstoff Polyoxymethylen, der auch als *Polyformaldehyd* oder Polyacetal bekannt ist. Er wurde unter dem Namen Delrin® zunächst von DuPont vertrieben. Weitere Marken wie Hostaform®, Kermatal®, Sniatal® oder Ultraform® kamen von anderen Herstellern hinzu.

Eigenschaften

Die sehr guten mechanischen Gebrauchseigenschaften des Thermoplasts gehen auf den kristallinen Anteil von etwa 70%–75% zurück. Neben den guten Werten für Steifigkeit und Festigkeit sind die chemische Resistenz gegenüber Kraftstoffen, Ölen und Lösungsmitteln sowie die guten Federungseigenschaften besonders herauszustellen. Der niedrige Reibwiderstand und die hohe Abrieb-, Verschleiß- und Ermüdungsfestigkeit machen Polyacetal vor allem als Lager- und Zahnradwerkstoff geeignet. Die hohe Maßhaltigkeit ist ideal für Präzisionsbauteile. Der Werkstoff weist eine hohe Formstabilität bei hohen Temperaturen von über 100°C auf und besitzt gute isolierende Eigenschaften gegenüber elektrischen Strömen. Einsatzfälle bis zu Temperaturen von -40°C sind denkbar. Der Kunststoff ist milchig-weiß bis grau, kann aber gefärbt werden. Häufig wird das Eigenschaftsprofil durch Einbettung von Fasersträngen verbessert. Unter Sonneneinstrahlung ist eine Versprödung von POM-Bauteilen festzustellen.

Verwendung

Die Anwendungsbeispiele für Polyacetal liegen meist im technischen Bereich, wo die teils hervorragenden mechanischen Eigenschaften voll ausgeschöpft werden können. So werden neben Zahnradern, Lüfterrädern, Ventilkörpern, Schnappverbindungen und Gleitlagern Bauteile für Uhrenwerke, für die Feinwerktechnik und für Messgeräte hergestellt.



Bild: Zugentlastung für Kabel aus POM.

Das weitere Produktspektrum des Werkstoffs reicht von Griffen, Scharnieren, Gardinenhaken und Tankdeckeln bis zu Rollschuhstoppeln, Reißverschlüssen, Spielzeugen und Klammern für Hosenbeine. Im Möbelbereich wird POM für Beschläge, Scharniere und Türgriffe verwendet. Wegen seiner Formstabilität auch bei hohen Temperaturen findet der Werkstoff außerdem bei Espressomaschinen Anwendung.

Verarbeitung

Polyacetal lässt sich sehr einfach blasformen und zu Profilen wie Stangen oder Rohren extrudieren. Durch Spritzgießen können Wandstärken von 0,1 mm für Gehäuseteile aller Art (Büromaschinen, Kameras, Elektrogeräte) erreicht werden. Bei glasfaserverstärkten POM-Varianten ist ein etwa 20% höherer Einspritzdruck an der Maschine einzustellen. Die umformende Formgebung ist für POM eher unüblich. Gute Fügeverbindungen können durch das Warmgas-, Heizelemente- und Reibungsschweißen unter Ultraschall erzeugt werden. Kleben ist schwierig, da Polyoxymethylen zu den Kunststoffen mit niedriger Oberflächenenergie zählt. Um die Haftung des Klebstoffs zu erhöhen sollte die Oberfläche zum Beispiel durch Beflammen vorbehandelt werden (Hellerich, Harsch, Haenle 2001). Dann sind Zweikomponentensysteme für die Klebeverbindung geeignet.



Bild: Spielzeug aus POM./ Foto: BASF SE

Handelsformen

Wie bei allen Thermoplasten üblich wird auch POM in Form von Granulaten weiter verarbeitet. Halbzeuge wie Stangen, Platten, Blöcke, Tafeln und Rohre sind auf dem Markt erhältlich.

Alternativmaterialien

PA, PTFE, PET, PBT

KUN 4.1.9 Thermoplaste – Ethylvinylacetat (EVA)

Der Thermoplast Ethylvinylacetat ist einer der bedeutendsten Werkstoffe zur Herstellung von Frischhaltefolie aller Art. Diesen besonderen Einsatzzweck verdankt das Material seiner Eigenschaft, auch noch bei niedrigen Temperaturen stark zu schrumpfen, eine Qualität also, die vor allem für das luftdichte Aufbewahren von Lebensmitteln in Gefriertruhen wichtig ist.

Eigenschaften

Mit Ethylvinylacetat (EVA) wird eine Gruppe von Copolymeren bezeichnet, die durch Polymerisation von Ethylen und Vinylacetat entstehen. Daher sind auch noch andere Schreibweisen wie Ethylen/Vinylacetat, Ethylvinylacetat oder E/VA im Umlauf. Obwohl die Kettenmoleküle starke Verzweigungen aufweisen, ist die Struktur nur an wenigen Stellen kristallin. Daher sind Ethylvinylacetate thermoplastisch und lichtdurchlässig. Dichte und Eigenschaften richten sich vor allem nach dem Vinylacetatgehalt (VA). Bei geringem Anteil VA ist der Werkstoff im Vergleich zu PE-LD lichtdurchlässiger, zäher, flexibler und formstabiler unter Wärme. Ein größerer Vinylacetatgehalt reduziert die Festigkeit, Steifigkeit und Beständigkeit gegenüber chemischen Stoffen. Bei einem VA-Anteil von über 30% ist die Flexibilität des Polymerwerkstoffs fast kautschukähnlich. Die Eigenschaften gleichen dann weichem Polyvinylchlorid (PVC-P). Gleichzeitig steigen Reiß- und Stoßfestigkeit sowie Lichtdurchlässigkeit und Glanz. Das Adhäsionsvermögen nimmt zu, so dass sich EVA mit hohem Vinylacetatgehalt für Beschichtungen und als Klebstoff eignet. Der thermoplastische Werkstoff ist bei Temperaturen zwischen -50°C und $+60^{\circ}\text{C}$ dauerhaft anwendbar. Das Aufnahmevermögen für anorganische Füllstoffe wie Ruß, Kreide oder Glimmer ist gut.

Verwendung

Das typische Anwendungsfeld für Ethylvinylacetat ist der Verpackungsbereich. Im Haushalt findet es überall dort Einsatz, wo etwas bei tiefen Temperaturen gelagert werden soll (z. B. Tiefkühlkost, Eiswürfel). Auf Grund einer kautschukähnlichen Flexibilität ist EVA vor allem auch für Schuhsohlen oder falt- und formbare Spielzeuge geeignet. In der Elektroindustrie wird das Polymermaterial für Kabelummantelungen und -beschichtungen verwendet. Weitere Anwendungsbeispiele sind Verschlüsse, Dichtungen, die Buchbindung, Landwirtschaftsfolien, flexible Rohre oder Zwischenschichten in Sicherheitsgläsern. Mit einem Vinylacetatgehalt von 70-95% eignet sich EVA auch als Klebstoff und ist Bestandteil in Pulverbeschichtungen, Emulsionsfarben und Poliermitteln (Peters, Struhk 2008). In der Photovoltaik wird das Material zur Einbettung von Solarzellen verwendet.

Verarbeitung

Die Techniken zur Verarbeitung von EVA sind mit denen von PE-LD vergleichbar. Spritzgießen ist bei Temperaturen zwischen 175°C und 220°C , die Extrusion bei 140°C - 180°C möglich. Auch zum Blasformen von Hohlgeometrien kann der Polymerwerkstoff Verwendung finden. EVA-Folienmaterial lässt sich leicht bedrucken. Es kann zudem gut heiß gesiegelt und geklebt werden. Als Fügeverfahren eignen sich das Warmgas-, Reibungs- und Heizelementeschweißen.



Bild: Surfbrett-Standflächenbelag aus EVA mit unterschiedlichen Oberflächen./ Quelle: Lorch-Boards/
Design: UNITEDDESIGNWORKERS.com

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

EVA ist als Granulat, Dispersion oder Folienmaterial erhältlich. Halbzeuge existieren in Schlauchform oder als flexible Rohre.

Alternativmaterialien

PVC-P, PE-LD



KUN 4.1.10 Thermoplaste – Fluorpolymere

Fluorpolymere sind eine Gruppe technischer Kunststoffe, deren außergewöhnliche Eigenschaften auf die Polymerisation unter Einwirkung von Fluor zurückgehen. Die Herstellung von Fluorpolymeren gelang erstmals in der Mitte der 30er Jahre. Der Vertreter mit der größten Bedeutung ist **Polytetrafluorethylen (PTFE)**, das unter den Handelsnamen **Teflon®** oder **Hostaflon®** vertrieben wird. Weitere Fluorpolymere sind **Perfluorethylenpropylen-Copolymer (FEP)** oder **Polychlortrifluorethylen (PCTFE)**.

Eigenschaften

PTFE ist ein hochtemperaturbeständiger, unbrennbarer Kunststoff mit der höchsten Chemikalienresistenz aller synthetisch hergestellten Werkstoffe. Die extremen Eigenschaften der Fluorpolymere gehen auf eine feste Atombindung und einer verschraubten Molekularstruktur mit einem hohen kristallinen Anteil zurück. Der Einsatzbereich von PTFE reicht von -269°C bis $+280^{\circ}\text{C}$. Bei höheren Temperaturen erweicht der Werkstoff lediglich, schmilzt aber nicht und ist unbrennbar. Anders als FEP, das ab einer Temperatur von 360°C wie ein Thermoplast verarbeitet werden kann, zählt PTFE nur bedingt zu den thermoplastischen Werkstoffen (Schwarz 2002). Trotz der hohen Temperaturstabilität besitzt der Werkstoff nur geringe Festigkeit und Härte, ist weich und biegsam, aber auch äußerst gleitfähig. Die isolierenden Eigenschaften gegenüber elektrischen Strömen sind hervorragend. PTFE verfügt über eine undurchsichtige, milchig-weiße Erscheinung. FEP und PCTFE ähneln in ihren Eigenschaftsprofilen PTFE, haben aber nur eine untergeordnete Bedeutung.

Verwendung

Wegen der hohen chemischen Beständigkeit ist Polytetrafluorethylen ein Hochleistungskunststoff mit idealen Eigenschaften für die Verwendung in Laborumgebungen. Weitere industrielle Verwendungsbereiche sind Lager, O-Ringe, Dichtungen, elektrische Hochtemperaturisolierungen und chemisch beanspruchte Rohrleitungen. Außerdem werden PTFE-Werkstoffe für Antihaf-Beschichtungen bei Haushaltsgeräten und technischen Teilen verwendet. Geschäumtes Filmmaterial mit mikroporöser Oberflächenstruktur wird im Textilbereich für wasserabweisende und gleichzeitig luftdurchlässige Kleidungen angewendet (z. B. **GoreTex®**). FEP findet Einsatz im chemischen Apparatebau und der Medizintechnik. Der Anwendungsbereich von PCTFE liegt in der Reaktortechnik.

Verarbeitung

Die Verarbeitung fluorhaltiger Kunststoffe ist sehr schwierig und kostenintensiv. Da Polytetrafluorethylen nahezu unschmelzbar ist, kann es nur fast ausschließlich durch die sintertechnische Verfahrenskette ⁴ FOR 2 verarbeitet werden. Im Gegensatz dazu lässt sich FEP und auch PCTFE bei hohen Temperaturen spritzgießen. Die zerspanende Bearbeitung durch Drehen, Fräsen oder Bohren ist bei allen Fluorpolymeren möglich, wird aber wegen der hohen Materialkosten in der Regel vermieden. Die Herstellung von Klebe- und Schweißverbindungen ist ebenso unüblich. Durch Wirbelsintern aufgebrauchte FEP-Beschichtungen werden für den Korrosionsschutz eingesetzt. Die Verschleißverhalten metallischer Bauteile kann durch Aufsintern mit PTFE verbessert werden.

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Die hohen Kosten und aufwändige Verarbeitung macht die Materialgruppe nur für Spezialanwendungen geeignet. Als Pulver auf dem Markt erhältliche Werkstoffe bilden den Ausgangspunkt für die sintertechnische Verarbeitung.

Alternativmaterialien

Polyimide



Bild: Jacke aus GoreTex®.

KUN 4.1.11

Thermoplaste – Polyester

Zur Gruppe der linearen Polyester zählen **Polybutylenterephthalat (PBT)** sowie **Polyethylenterephthalat (PET)** mit Handelsnamen wie Vestodur®, Arnite® oder Ultradur®. PET wurde erstmals 1966 von Akzo eingeführt. PBT kommt wegen der leichteren Verarbeitung durch Spritzgießen insbesondere als Konstruktionswerkstoff in der Automobilindustrie zum Einsatz.

Eigenschaften

Polyester sind teilkristalline Thermoplaste mit guten mechanischen Eigenschaften, auch bei Temperaturen von über 100 °C. Vergleichbar mit der Oberflächenfarbe von POM oder PA, besitzen sie eine elfenbeinartige, milchigweiße Erscheinung. Darüber hinaus ist auch die Verarbeitung für glasklare Anwendungen möglich. PBT und PET sind abriebfest, besitzen hohe Festigkeit und Steifigkeit, gute Gleit- und Isolationseigenschaften und eine sehr hohe Maßbeständigkeit, was sie vor allem für die Anfertigung von Präzisionsbauteilen geeignet macht. Die chemische Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln und Treibstoffen ist gut, jedoch reagieren lineare Polyester empfindlich auf heißes Wasser, Dampf, starke Säuren und Laugen.



Bild: Wasserflasche aus PET.

Verwendung

Eines der Hauptverwendungsgebiete für Polyester mit ihren ausgezeichneten isolierenden Eigenschaften ist der elektronische Bereich. Die gute Maßhaltigkeit macht PBT und PET darüber hinaus für Präzisionsbauteile in der Feinmechanik geeignet. Typische Anwendungen sind Elektrowerkzeuggehäuse, Motorenteile, Zahnräder, Stecker, Spulenkörper oder Platinen.

Besonders bekannt ist die spritzgeblasene PET-Kunststoffflasche. Im Vergleich zur Glasflasche ist sie wirtschaftlicher herzustellen, verfügt über ein geringeres Gewicht und kann recycelt werden. Insgesamt weisen PET-Flaschen über die gesamte Lebensdauer eine sehr gute Umweltbilanz auf und sind um ein Viertel energieeffizienter als Behältnisse aus einem anderen Material (Emsley 2006). Polyesterfasern im Textilbereich sind knitterfrei, reißfest, witterungsbeständig und nehmen nur sehr wenig Wasser auf ^{TEX 4.4.3}. Formteile und Folien aus PET sind zudem unbedenklich als Verpackungen im Lebensmittelbereich einsetzbar. Weitere Anwendungsfelder sind Haushaltsgeräte, Surfsegel, Kunstrasen oder Kreditkarten. Zudem kommt Polytetrafluorethylen als Festschmierstoff ^{FLU 2.5} zum Einsatz.

Ein neuer Freischwinger aus PBT wurde Ende 2007 von dem Designer Konstantin Grcic präsentiert. Er verwendete Polybutylenterephthalat mit Markennamen »Ultradur high speed®«, eine Neuentwicklung von BASF. Dieses enthält ein Additiv aus Nanopartikeln ^{MET 5.4} mit Größen zwischen 50 bis 300 Nanometern, die das Fließverhalten des erhitzten Kunststoffes insofern verändern, dass sich selbst dünnwandige Bauteile mit einem hohen Anteil an Verstärkungsmaterialien herstellen lassen. Bei konventionellen Faserzusätzen wie Glasfasern war dies bislang nicht ohne weiteres möglich (Edelmann 2007).

Verarbeitung

PET wird vorzugsweise im Spritzguss verarbeitet. Halbzeuge wie Folien, Profile oder Platten entstehen durch Extrusion. Das Umspritzen von Metallbauteilen mit Polyesterkunststoffen ist möglich. Fügeverbindungen können geschweißt (Heißgas-, Reib-, Ultraschallschweißen) oder geklebt (z. B. Reaktions- oder Cyanacrylatklebstoffe) werden. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit sind Polymerblends aus PET und PMMA, PBT oder PSU erhältlich. Auf Grund des günstigeren Abkühlverhaltens kann PBT besser im Spritzguss verarbeitet werden als PET. Polyester lassen sich einfärben.

Handelsformen

Halbzeuge aus PET oder PBT sind in Form von Rohren, Profilen, Tafeln oder Folien erhältlich.

Alternativmaterialien

PA, POM, PC, Glas, PMMA, Biopolymer PLA

Bild: Surfsegel aus Polyestermaterial.

KUN 4.1.12 Thermoplaste – Zelluloseester

Unter Zelluloseester werden alle Kunststoffe zusammengefasst, deren molekularer Aufbau auf **Zellulose** und nicht, wie bei den meisten anderen Kunststoffen, auf Erdöl zurückzuführen ist. Als natürliche Faser ist Zellulose ein wesentlicher Bestandteil von Baumwolle, Laub- oder Nadelhölzern. Sie neigt auf Grund ihrer besonderen Wasserstoffbrückenbindung zur Kristallisation und Bildung linearer Makromoleküle.

Eigenschaften

Die auf Zellulose basierenden Kunststoffe sind transparente bis durchsichtige Thermoplaste mit einer Lichtdurchlässigkeit von nahezu 90%. Je nach Anwendung kann die Oberfläche eine glasklare, matt transluzente oder natürlich strukturierte Erscheinung aufweisen. Da das Zellulosemolekül sehr steif ist, richtet sich das Eigenschaftsprofil der Zelluloseester vor allem nach der Menge der enthaltenen Weichmacher. Mit zunehmendem Anteil nehmen die Wärmefestigkeit ab und die Fließfähigkeit zu. Die Qualität der Verarbeitbarkeit wird deutlich verbessert. Auf Grund der Eigenschaft zu starker Wasseraufnahme sind die auf Zellulose basierenden Kunststoffe antistatisch und daher nicht Staub anziehend. Sie neigen im Gebrauch zu einem selbstständig polierenden Effekt. Die wichtigsten Zelluloseester sind **Zelluloseacetat (CA)**, **Zellulosetriacetat (CTA)** und **Zelluloseacetobutyrat (CAB)**. Diese sind beständig gegen Fette, Öle, Kraftstoffe oder schwache Säuren und können bis zu einer Temperatur von etwa 100°C verwendet werden. Sie sind allerdings nicht für den Kontakt mit Lebensmitteln zugelassen.

Verwendung

Eine der Hauptanwendungen von Zelluloseestern sind isolierende Werkzeuggriffe. Hierzu werden sie entweder auf das metallische Bauteil aufgeschumpft oder umspritzt. Da Zelluloseester nur schwer entflammbar sind, werden sie zudem für Sicherheitsfilme und Sicherheitsgläser verwendet. Weitere typische Anwendungen sind Hammerköpfe, Griffe von Schreibgeräten, Gehäuse in der Fernmeldetechnik, Brillenfassungen, Taucherbrillen, Kfz-Lenkradummantelungen, Lampenschirme, Zahnbürstenstiele, Schablonen oder Spielzeuge. CA-Folien werden in Handydisplays oder Flachbildschirmen verarbeitet. Im Textilbereich sind die Werkstoffe als Acetatfasern bekannt und kommen mit ihrem matteden Glanz vor allem als Kunstseiden zur Anwendung. Die geringe Neigung zur Wasseraufnahme macht CA-Fasern für Regenschirme geeignet. Neben dem Textilbereich wandert ein Großteil der Acetatfaserproduktion in die Herstellung von Zigarettenfiltern.

Verarbeitung

CA und CAB lassen sich sehr gut spritzgießen oder strangpressen. Folien und Platten werden mit Breitschlitzdüsen extrudiert. CTA wird in der Regel zu Folienmaterial vergossen. Eine spanlose Umformung erfolgt im Temperaturbereich zwischen 160°C und 180°C. Für große Behälter mit gleichmäßiger Wandstärke ist das Rotationsgießen geeignet (Hellerich, Harsch, Haenle 2001). Zelluloseester können eingefärbt werden. Beschichtungen an metallischen Bauteilen werden durch thermisches Spritzen oder Umspritzen (z. B. Griffe von Schraubendrehern). Unlösliche Verbindungen lassen sich mit Kleblacken oder 2-Komponentenklebstoffen erzeugen. Zur Veredelung können Zelluloseesteroberflächen bedruckt, lackiert oder metallisiert werden. Auch Heißprägen ist üblich. Die Kratzfestigkeit kann durch einen dünnen Silikonfilm erhöht werden. Für den Korrosionsschutz werden Metalle in der Wirbelsintertechnologie nach Erwärmung auf über 300°C mit Zelluloseesterpulver beschichtet (Peters, Struhk 2008).

Handelsformen

Die Folie ist das typische Halbzeug, in denen Zelluloseester vertrieben werden. Auch Rohre aus CAB sind auf dem Markt erhältlich.

Alternativmaterialien

PE, PC, PVC, PMMA



Bild: Griff eines Schraubendrehers aus Zelluloseester.

KUN 4.1.13

Thermoplaste – Polyimide

Polyimide (z. B. *Polyetherimid - PEI, Polyamidimid - PAI*) sind Hochleistungswerkstoffe für Anwendungsfälle unter hohen Temperaturen, die erstmals 1963 am Markt eingeführt wurden.

Eigenschaften

Die durch Polykondensation hergestellten Kunststoffe können sowohl thermo- als auch duroplastische Eigenschaften aufweisen. Im Vergleich mit anderen thermoplastischen Kunststoffen sind sie die Werkstoffe mit der höchsten mechanischen Warmfestigkeit, wodurch eine Verwendung zwischen -240°C und $+260^{\circ}\text{C}$ möglich ist (Hellerich, Harsch, Hanle 2001). Darüber hinaus zeichnen sich Polyimide durch hohe Steifigkeit, hohe Verschleißfestigkeit, gute elektrische Eigenschaften und gute Gleiteigenschaften aus. Sie sind chemisch beständig gegen Lösungsmittel, Fette, Öle, Kraftstoffe, verdünnte Säuren und Laugen. Auffällig ist zudem die schwere Entflammbarkeit. Bei der Verbrennung kommt es nur zu geringer Rauchentwicklung. Die äußere Erscheinung von Polyetherimid (PEI) ist gekennzeichnet durch eine bernsteinähnliche Transparenz.

Verwendung

Auf Grund der hohen Werkstoffkosten werden Polyimide lediglich in Bereichen verwendet, in denen sich das Eigenschaftsprofil besonders vorteilhaft ausnutzen lässt. Die hohe Beständigkeit gegen Strahlungen macht eine Verwendung in Kernanlagen möglich. Polyimide werden darüber hinaus wegen ihrer guten Festigkeit bei hohen Temperaturen und ihrer geringen Wärmedehnung in Verbrennungsmotoren und Düsentriebwerken für die Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Die schwere Entflammbarkeit macht den Werkstoff zudem für Teile im Flugzeuginneren geeignet. Weitere typische Verwendungen sind Kochgeräte für Mikrowellenherde, Motorteile für Kraftfahrzeuge oder Turbinenschaufeln. Polyimid-Schaumstoffe werden zur Schalldämmung im hohen Temperaturbereich verwendet. Außerdem kommen sie in Lacken für Flugzeugrümpfe zur Anwendung.

Verarbeitung

Thermoplastische Polyimide wie PAI und PEI lassen sich durch Spritzgießen bei hohen Temperaturen um 350°C zu komplexen Formteilen und durch Extrusion zu Profilen und Folien verarbeiten. Zudem kann PEI durch Spritzblasen geformt und geschäumt werden. Die Verarbeitbarkeit wird durch Zumischung von niedrig schmelzenden technischen Thermoplasten (z. B. PA oder PC) verbessert.

Neben Spritzgießen und Extrudieren bietet die sintertechnische Prozesskette eine Alternative zur Verarbeitung von Polyimiden mit duroplastischen Eigenschaften.

Der pulverförmige Ausgangswerkstoff, der je nach Anwendungszweck mit Zusatzstoffen ergänzt werden kann, wird dabei in Formen gepresst. Kleinformatige Bauteile können auf diese Weise kostengünstig in hohen Losgrößen gefertigt werden. Die Presslinge verlangen anschließend keinerlei Nachbearbeitungsaufwand. Die zerspanende Bearbeitung von Polyimid-Halbzeugen ist mit Hartmetall-Werkzeugen möglich. Für Fügeverbindungen stehen Epoxid- und Phenolharzklebstoffe zur Verfügung. Metallbauteile können durch Wirbelsintern beschichtet werden.

Eltimid®

Kurzzeitig hält das Polyimid mit Markennamen *Eltimid®* Temperaturspitzen von bis zu 400°C aus. Die extreme Temperaturbeständigkeit macht den Hightech-Kunststoff vor allem für den Bereich der Luft- und Raumfahrt interessant und lässt ihn in Konkurrenz treten zu Aluminium oder Keramiken.



Bild: Polyimid in Lacken auf Flugzeugrumpf / PEI wird wegen der hohen Temperaturfestigkeit und geringen Rauchgasbildung beispielsweise bei der Innenausstattung von Flugzeugen eingesetzt.

Wirtschaftlichkeit und Handelsformen

Trotz ihres hohen Preises haben sich Polyimide zu einem wichtigen Material für Hochtemperaturanwendungen entwickelt. Profile und Folien sind erhältlich.

Alternativmaterialien

PTFE, Epoxidharze

KUN 4.1.14 Thermoplaste – Polymerblends

Die Bezeichnung »blends« stammt aus dem Englischen und bedeutet Mischung. Demnach sind Polymerblends Mischungen verschiedener Kunststoffe, durch deren unterschiedliche Eigenschaften Werkstoffe mit besonderen Profilen gewonnen werden können. Auf Grund der meist nur eingeschränkten Möglichkeit zur sortenreinen Trennung der unterschiedlichen thermoplastischen Werkstoffe vor der Wiederverwertung stehen recycelte Kunststoffgranulate meist nur in Form von Kunststoffgemischen als thermoplastische Blends zur Verfügung (→ KUN 2.3 zum Kunststoffrecycling).

Eigenschaften

Ein häufig verwendetes Polymerblend trägt den Handelsnamen Bayblend®, eine Mischung aus der Polystyrol-Sorte ABS und Polycarbonat (PC). Das preiswerte ABS weist in der Regel eine nur mäßige Wärmeformbeständigkeit auf, was durch Zumischung von PC ausgeglichen wird (Wärmeformbeständigkeit des Blends bis 120°C). Polycarbonat bildet die Stabilität gebende Matrix, in die ABS-Komponenten eingelagert werden (→ VER). Bayblend® ist eine der wenigen Polymermischungen, bei denen neben der bloßen Addition der Vorzüge der Basiswerkstoffe auch ein Synergieeffekt erzielt wird. Die hohen Zähigkeitswerte unter Schlagbeanspruchung werden von keinem der beiden Partner auch nur annähernd erreicht. Der Werkstoff weist eine matt glänzende und kratzfeste Oberfläche mit hohen Härtewerten auf, ist zudem witterungsbeständig und vergilbt nicht. Die mechanischen Eigenschaften können durch Zumischung von kurzen Glasfasern verbessert werden. Terblend® N, eine Mischung aus der Polystyrol-Sorte ABS und Polyamid PA, bietet gegenüber Blends mit Polycarbonat Gewichtsvorteile und muss nicht mehr lackiert werden.



Eine weitere preiswerte Polymermischung mit ähnlichen Eigenschaften wie Bayblend®, also hoher Wärmeformbeständigkeit und guter Maßhaltigkeit, ergibt sich durch Zumischung von hochschlagfestem Polystyrol (HI-PS) und Polyphenylenoxid (PPO). Die Verarbeitbarkeit in der Schmelze wird auf diese Weise verbessert. Unterschiedliche Anteile an Polystyrol führen zu einer großen Anzahl unterschiedlicher Güteklassen, die dem jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden können.

Mischbarkeit verschiedener Kunststoffe											
Werkstoff	Mischbarkeit mit:										
PMMA	ABS	PC	PMMA	PVC	SAN	PS	PA	PE-HD	PE-LD	PET	PP
PC	PC	PET	PMMA	ABS	SAN	PVC	PA	PE-HD	PE-LD	PP	PS
ABS	ABS	PMMA	SAN	PC	PVC	PET	PA	PE-HD	PE-LD	PP	PS
SAN	ABS	PMMA	SAN	PC	PVC	PA	PE-LD	PE-HD	PET	PP	PS
PVC	PMMA	PVC	SAN	ABS	PC	PA	PE-HD	PE-LD	PET	PP	PS
PET	PC	PET	ABS	PA	PS	PE-HD	PE-LD	PMMA	PP	PVC	SAN
PS	PS	PMMA	PA	PET	ABS	PC	PE-HD	PE-LD	PP	PVC	SAN
PA	PA	PET	PS	ABS	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	PP	PVC	SAN
PE-HD	PE-HD	ABS	PA	PC	PE-LD	PET	PMMA	PP	PS	PVC	SAN
PE-LD	PE-LD	ABS	PA	PC	PE-HD	PET	PMMA	PP	PS	PVC	SAN
PP	PP	ABS	PA	PC	PE-HD	PE-LD	PET	PMMA	PS	PVC	SAN

sehr gut schlecht

Abb. 25 nach [40]

Verwendung

Die vorgestellten Mischungen sind als undurchsichtige, hellgraue Technik-Thermoplaste mit ausgewogenem Verhältnis der Eigenschaften und des Kostenfaktors bekannt. Sie kommen vor allem in der Gehäusetechnik, für Fernsehkomponenten oder Kfz-Teile zur Anwendung. PPO-Blends sind vor allem für Komponenten von Wasch- und Geschirrspülmaschinen, Pumpengehäuse oder Bauteile im Heißwasserbereich geeignet.

Verarbeitung

Die Verarbeitung von Polymerblends richtet sich nach den Eigenschaften der einzelnen Komponenten. In der Regel werden Formteile im Spritzguss erstellt.

Bild links: Für die Verkleidung der neuen Daytona 675 verwendet der britische Motorradhersteller Triumph Terblend® N (ABS/PA) der Styrolution GmbH. Der Spezialkunststoff weist gleichzeitig eine geringe Dichte und eine hohe Zähigkeit auf. Dadurch ermöglicht er die Produktion von dünneren und damit leichteren Bauteilen. Triumph hat so das Gesamtgewicht der Maschine deutlich reduziert. Dank der guten Wärmeformbeständigkeit von Terblend® N ließ sich die Verkleidung auch in der Nähe des Motors und des Auspuffes anbringen. So erhält die Daytona 675 ihre charakteristisch schmale Silhouette./ Foto: Triumph Motorcycles Ltd.



<http://www.springer.com/978-3-642-02641-6>

Handbuch für Technisches Produktdesign

Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für

Designer und Ingenieure

(Eds.) A. Kalweit; C. Paul; S. Peters; R. Wallbaum

2012, XIX, 616 S. 1500 Abb., 700 in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-02641-6