



Bild: Turnschuh adidas »a<sup>3</sup>«. Extrem belastbare und superweiche Zwischensohle aus Elastollan® (thermoplastisches Polyurethan-Elastomer)./  
Hersteller und Foto: BASF Polyurethanes GmbH

## KUN KUNSTSTOFFE

Abdichtfolie, Abdeckhaube, Ampel, Angelrute, Angelschnur, Arbeitsplatte, Armatur, Aufkleber, Badewanne, Batteriekasten, Becher, Behälter, Benzinschlauch, Beschichtung, Besteckgriff, Bilderrahmen, Billardkugel, Blisterverpackung, Blumenkasten, Blumensteckschwamm, Blumentopf, Bodenbelag, Brillenglas, Brillengestell, Büroartikel, Bürste, Campinggeschirr, CD, Computergehäuse, Computertastatur, Dachfolie, Dachrinne, Dämmplatte, Dichtung, Drahtisolation, Drehverschluss, Dübel, Dunstabzugshaube, Duschvorhang, DVD, Eierbecher, Einweggeschirr, Eiskübel, Fassadenverkleidung, Feder, Feuerzeug, Fensterprofil, Filmdose, Filmspule, Filter, Fischereinetz, Flasche, Flugzeuginnenverkleidung, Flugzeugmodell, Förderband, Frischhaltefolie, Frisierhaube, Fußball, Gardinenrolle, Gartenmöbel, Gefrierbeutel, Gemüseschale, Getränkekasten, Gleitlager, Gummistiefel, Haarspange, Handtasche, Handgehäuse, Hartschalenkoffer, Heizungsgebläse, Hochsprungstange, Hundenapf, Imprägniermittel, Inliner, Isolierrohr, Joghurtbecher, Kabelanschluss, Kabelführung, Kabelummantelung, Kaffeefilter, Kamm, Kammerazubehör, Karosserie, Kassettengehäuse, Kindermöbel, Klarsichthülle, Klebefolie, Klebstoff, Kleiderbügel, Klemmleiste, Knopf, Kolbenring, Kontaktlinse, Kopfhörerbügel, Kosmetikdose, Kreditkarte, Kühltankschrankinnenbehälter, Kugelschreibergehäuse, Kunstblume, Kunstrasen, Kunstleder, Lampenschirm, Laufrollen, Leiterplatte, Leuchtreklame, Lichtdach, Linse, Lüfterrad, Lüftungssystem, Luftballon, Luftmatratze, Lupe, Mikrowellengeschirr, Modelleisenbahn, Modeschmuck, Motorradhelm, Motorhaube, Müllcontainer, Musikinstrument, Obstschale, Ohrenstäbchen, Pfannengriff, Plane, Propeller, Protektor, Pumpengehäuse, Puppe, Radkappe, Reflektor, Regenmantel, Reifen, Rohrleitung, Rolladenprofil, Rollschuhstopper, Salatschale, Schallplatte, Schallschutz, Schalthebel, Scharnier, Schaumstoffmatratze, Scheinwerfergehäuse, Schirm, Schlauch, Schlitten, Schnappverschluss, Schneidebrett, Schrumpffolie, Schrumpfschlauch, Schuhabsatz, Schuhsohle, Schuhspanner, Schutzverglasung, Segelboot, Segel, Sicherheitskleidung, Silofolie, Sitzsack, Sitzschale, Spielzeug, Sommerskipiste, Spoiler, Sprungmatte, Spulenkörper, Staubsaugerteil, Starkstromisolator, Stecker, Steckdose, Stoßstange, Stuhl, Surfbrett, Tastatur, Telefongehäuse, Teppichgewebe, Tischdecke, Tischplatte, Tischtennisball, Toilettensitz, Tonband, Trafogehäuse, Tragetasche, Transportkasten, Treibstofftank, Trennwand, Tube, Türfüllung, Türgriff, Uhrglas, Unterwasserscheinwerfer, Ventilator, Verbandkasten, Verbundfolie, Verkehrsschild, Verpackung, Verschlussstopfen, Verteilerdose, Videokassette, Wärmflasche, Wäscheklammer, Wäschekorb, Warndreieck, Warnsignal, WC-Spülkasten, Werbebanner, Werkzeuggriff, Wohnwagenverglasung, Würfel, Zahnbürste, Zahnersatz, Zahnrad, Zeichengerät, Zelt, Zierprofil, Zündkerzenstecker



Anders als Metalle, Keramiken oder Hölzer sind synthetische Werkstoffe künstlich hergestellte Materialien, die dank ihres sehr großen Anwendungsspektrums und der wirtschaftlichen Verarbeitung weit verbreitet sind. Wurden die ersten Kunststoffe im 19. Jahrhundert noch aus Naturprodukten wie Kautschuk oder Zellulose gewonnen, ist heute Erdöl der Hauptrohstoff für die Produktion von Kunststoffen. Die Möglichkeit zur fast beliebigen Einstellung der Materialeigenschaften hat den synthetischen Werkstoffen den Einzug in nahezu alle Lebens- und Technologiebereiche ermöglicht. Von der Arbeitschutzbrille bis hin zur Zahnbürste ersetzten sie die bis dahin üblichen Materialien und eröffneten zum Teil vollkommen neue Verwendungsfelder. Für manche gelten Kunststoffe gar als »Rückgrat der technisierten Zivilisation« (Phantastisch Plastisch 1995), ohne die Wohlstand in den Industrienationen nicht möglich gewesen wäre.

*Ende der sechziger Jahre war der Wunsch nach gesellschaftlicher Veränderung groß. Konservative Wertvorstellungen wurden abgelehnt, eine freie Lebensentfaltung bevorzugt. Aufblasbare Möbel aus Kunststoff oder mit Styroporkugeln gefüllte Sitzsäcke entsprachen diesem Zeitgeist. Der Mensch sollte durch die Form eines Möbelstücks nicht in eine vorbestimmte Haltung gezwungen werden, sondern vielmehr das Sitzmöbel sich an den menschlichen Körper anpassen.*



Bild: Aufblasbare Möbel aus PVC Kunststoff als Ausdruck der Protesthaltung gegen konservative Lebensentwürfe gegen Ende der 60er Jahre. »Blow Inflatable Armchair«, 1967, von P. Lomazzi, D. D'Urbino, J. De Pas, Produziert durch Zanotta S.p.A., Italien

Das positive Image dieser Werkstoffgruppe in unserer heutigen Zeit wurde den Kunststoffen aber nicht immer zuteil. Noch in den sechziger Jahren galten synthetische Materialien als ideale Grundlage, um durch die nahezu unendliche Freiheit in Formgebung und Farbigkeit der Protesthaltung gegenüber konservativen Lebensentwürfen Ausdruck zu verleihen. Die Verwendung von Kunststoffen hatte ihren ersten Höhepunkt erreicht. Ab den ausgehenden 70er Jahren waren sie allerdings unter dem Sammelbegriff »Plastik« als billig, minderwertig und umweltschädlich verschrien. Erst die Entwicklung synthetischer Hochleistungswerkstoffe (Fluorpolymere [KUN 4.1.9](#)), die Einführung eines consequenten Abfallrecyclings und der hochwertige Einsatz von Kunststoffen mit transluzenten Eigenschaften für Möbel, Haushaltsgeräte und Gebrauchsgegenstände in den 90er Jahren führte zu einer wieder positiven Einstellung gegenüber dieser Werkstoffgruppe. Das Entwickeln und Arbeiten mit Kunststoffen im Design wird dabei nicht mehr nur an formalästhetischen Qualitäten festgemacht, sondern wirft Fragen nach den Werkstoff-Kreisläufen [KUN 2.3](#) auf. Das Bild der mit Einweggeschirr gefüllten, überquellenden Mülltonnen konnte revidiert werden.



Bild: Kennzeichnung recyclingfähiger Kunststoffe.

Tatsächlich lassen sich in den letzten 150 Jahren eine ganze Reihe von Beispielen finden, die zeigen, dass der Einsatz von Kunststoffen die bisherige Sicht auf ein Produkt und seine Gebrauchsfunktionen revolutionierte.

Schon 1870 versuchten die Brüder Hyatt mit ihrer Erfindung einer Billardkugel aus Zelluloid [KUN 4.1.13](#), der Gefährdung der Elefanten als Quelle für Elfenbein entgegen zu wirken (Emsley 2006). 1907 entdeckte der Belgier Leo Hendrik Baekeland sowohl den duroplastischen Werkstoff Phenolharz [KUN 4.2.3](#), als auch ein Verfahren zum Verpressen dieses neuen Materials unter Hitze. Der unter dem Handelsnamen Bakelit® vertriebene Kunststoff trat für den Haushaltsgerätebereich in Konkurrenz zu Porzellan, Metall, Glas und Keramik. Auf Grund seiner schlechten Leitfähigkeit setzte er sich bei Thermoskannen und Bügeleisen, wegen der schweren Zerbrechlichkeit für Küchenwaagen und Gehäusen von Küchengeräten durch. Nach dem zweiten Weltkrieg machte der Chemiker Tupper durch die Erfindung eines luftdichten Verschlusses aus Polyethylen [KUN 4.2.5](#) von sich hören und wurde zum weltweit bedeutendsten Produzenten für Lebensmittelverpackungen.

Ab 1930 entwickelten sich Polyvinylchlorid <sup>KUN 4.1.5</sup> und Polystyrol <sup>KUN 4.1.3</sup> zu den wichtigsten Isolations- und Kabelmantelmaterialien für die Elektro- und Kommunikationstechnologie. PVC hat sich ab den 50er Jahren in der Produktion von Schallplatten durchgesetzt. Für die Speicherung von Daten auf CD und DVD werden seit den 90er Jahren Polycarbonat <sup>KUN 4.1.4</sup> oder Polymethylmethacrylat <sup>KUN 4.1.7</sup> verwendet.



Bild: Verwendung von Kunststoffen für Sportgeräte./  
Hersteller: LORCH-Boards/ Foto: Garzke/Franova/  
Design: UNITEDDESIGNWORKERS.com

Vor allem im Sport haben synthetische Werkstoffe zu einer enormen Leistungssteigerung beigetragen. Der erste Kunststoff-Skischuh aus Polyurethan <sup>KUN 4.2.5</sup> kam 1969 auf den Markt. Er wog nur 2 Kilogramm, war wesentlich bequemer als seine Vorgänger und verringerte vor allem das Unfallrisiko. Die Leichtigkeit und Elastizität moderner Sportschuhe förderte darüber hinaus die Leistungsfähigkeit der Sportler bei Laufwettbewerben. Besonders seien an dieser Stelle die Entwicklungen im Stabhochsprung genannt. Waren um 1940 noch Bambus- oder Holzstangen im Einsatz, so machte erst die Verwendung von Stabhochsprungstäben aus glasfaserverstärktem Epoxidharz <sup>KUN 4.2.2</sup> Sprünge über die Marke von 6 Metern möglich.

Im industriellen Bereich kann vor allem die Verwendung von Kunststoffen beim Bau von Kraft- und Nutzfahrzeugen herausgestellt werden. Wurden im Automobilbau noch vor Jahren vorwiegend metallische Werkstoffe verwendet, führte der Einsatz synthetischer Materialien zu einer Gewichtsverringering und optimierte den Kraftstoffverbrauch nachhaltig. Ein Mittelklassewagen enthält mittlerweile bis zu 150 kg Kunststoffe.

Der nächste Evolutionsschritt bei den synthetischen Werkstoffen sieht die Entwicklung funktionaler Polymere vor. Dies sind Kunststoffe, die entgegen ihrer traditionellen Qualitäten als Isolatoren auch Eigenschaften zur Leitung elektrischer Ströme und Wärme vorweisen können (Eibeck 2005). Während die thermische Leitfähigkeit die Kühlung von Prozessoren über die Gehäusewandung von elektrischen Komponenten beschleunigen soll, werden mit elektrisch leitfähigen Polymerwerkstoffen neue Anwendungen in den Bereichen Funketiketten zur Vereinfachung logistischer Prozesse (RFID) oder Licht emittierender Oberflächen (OLED) ermöglicht <sup>KUN 6.1</sup>. Weiterhin zählen zu den Funktionspolymeren auch solche mit transparenten Eigenschaften.

## KUN 1

### Charakteristika und Materialeigenschaften

Die besonderen Eigenschaften künstlicher Werkstoffe gehen auf ihren speziellen Produktionsprozess zurück, bei dem auf molekularer Ebene organische Kohlenwasserstoffverbindungen scheinbar beliebig zusammengesetzt werden. Grad und Art der molekularen Vernetzung sowie der chemische Aufbau sind dabei entscheidend für das spätere physikalische, mechanische und chemische Verhalten. Die große Anzahl existierender Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen basiert auf den vielfältigen Variationsmöglichkeiten in der Herstellung.

### KUN 1.1

#### Zusammensetzung und Struktur

Als Ausgangsstoffe für die Gewinnung von Kunststoffen dienen Erdöl, Erdgas oder Kohle, in denen sich Kohlenwasserstoffe hoch konzentriert haben (Schwarz 2002). Erdöl hat nach wie vor die höchste Bedeutung. In chemischen Anlagen werden zunächst einzelne Grundmoleküle gleicher Struktur (**Monomere**) synthetisch isoliert. Die eigentliche Herstellung der künstlichen Werkstoffe erfolgt durch Verknüpfung einer Vielzahl dieser Monomere zu faden- und kettenartigen Makromolekülen, den **Polymere**. Zu den wichtigsten Monomeren zählen Ethylen, Propylen, Vinylbenzol (Styrol), Vinylchlorid, Formaldehyd, Tetrafluorethylen, Vinylacetat und Methylmethacrylat (Hellerich, Harsch, Haenle 2001).

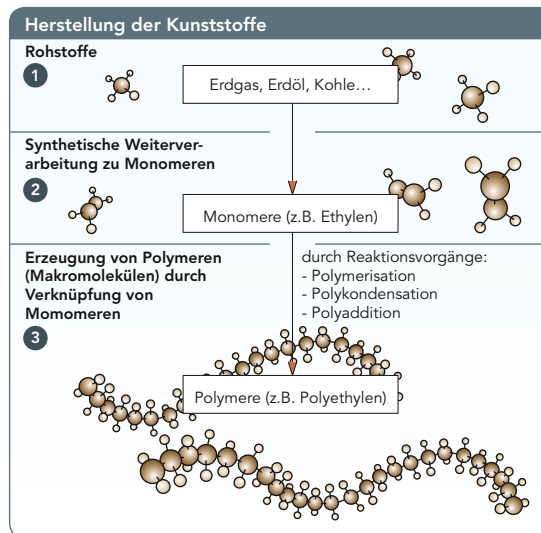


Abb.1: nach [6, 16]

Es existieren die drei Reaktionsmechanismen Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition, durch die makromolekulare Strukturen auf Basis von Monomeren entstehen können:

Die **Polymerisation** bezeichnet den Vorgang der fadenförmigen Aneinanderreihung durch eine ausgelöste Kettenreaktion zwischen reaktionsfähigen Monomeren und Auflösung der Mehrfachbindung unter Einfluss von Katalysatoren. Dabei können sowohl Monomere gleicher Zusammensetzung

(Homopolymerisation) als auch zwei oder mehrere Monomere unterschiedlicher Struktur (Co-Polymerisation) zur Reaktion gebracht werden.



**griech.:**

*durus* – hart

*therma* – Wärme

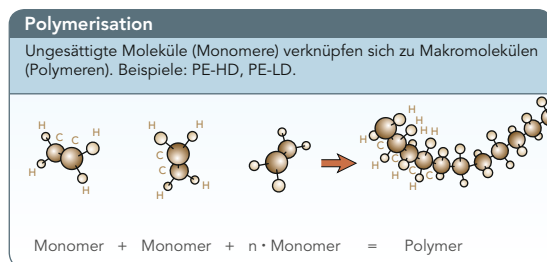


Abb.2: nach [4, 6, 40]

**Polykondensation** ist die stufenweise Verbindung einer Vielzahl von Monomeren zweier unterschiedlicher Strukturformen zu einem engmaschig vernetzten Makromolekül unter Abspaltung von Molekülen niedriger Komplexität wie beispielsweise Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

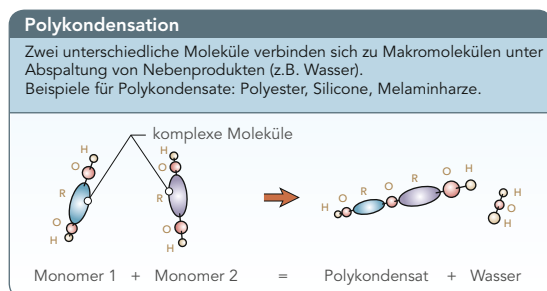


Abb.3: nach [4, 6, 40]

Bei der **Polyaddition** werden weit- oder engmaschige Polymerstrukturen durch wechselseitige Anlagerung verschiedener Monomere auf intermolekularer Ebene unter Platzwechsel von Wasserstoffatomen erzeugt. Beispielsweise gehen Polyurethane und Epoxidharze auf diesen Reaktionstyp zurück.

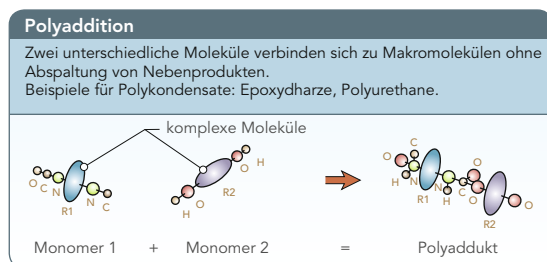


Abb.4: nach [4, 6, 40]

## KUN 1.2

### Einteilung der Kunststoffe

An Hand der innermolekularen Struktur und der daraus resultierenden Eigenschaften unterteilt man Kunststoffe in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Die Bezeichnung folgt den bei der Erwärmung erkennbaren Unterschieden im mechanischen Verhalten (Braun 2003, Retting 1991, Shackelford 2005).

**Thermoplaste** sind Makromoleküle mit einer fadenförmig verschlungenen, aber unvernetzten Polymerstruktur. Sie sind bei Raumtemperatur hart und meist spröde, lassen sich aber nach Erwärmung plastisch verformen. Bei starker Wärmezufuhr ist sogar mit einer Verflüssigung zu rechnen, da Verknüpfungspunkte zwischen den einzelnen Molekülfäden fehlen. Nach Überschreitung eines definierten Temperaturbereichs zersetzen sich Thermoplaste oder beginnen zu brennen.

#### Thermoplaste

**Eigenschaften:** warmumformbar, schweißbar, wiedereinschmelzbar.

**Aufbau:** Kettenmoleküle ohne Vernetzung.

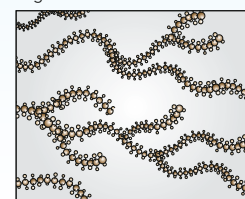
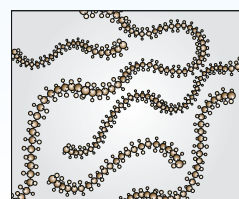


Abb.5: nach [6, 16]

Die Mehrzahl der bekannten Kunststoffe ist der Gruppe der Thermoplaste zuzurechnen (z. B. Polystyrol, Polypropylen, Polyethylen). Dies hängt vor allem mit der guten Bearbeitbarkeit zusammen. Thermoplaste lassen sich nach Erwärmung verformen, sind schweißbar und werden meist durch Spritzgießen <sup>FOR 1.2</sup> oder Extrudieren <sup>FOR 4</sup> zu Halbzeugen und Formteilen in großen Stückzahlen verarbeitet.

**Elastomere** (z. B. Silikone, Kautschuk) sind auf Grund ihrer weitmaschig vernetzten Molekularstruktur elastisch verformbar. Die Anzahl der Vernetzungspunkte bestimmt den Härtegrad bei Druckbeanspruchung. Nach Rücknahme einer Krafteinwirkung bildet sich die Verformung zurück. Daher sind Elastomere nicht bleibend verformbar. Auch bei Erwärmung verändert sich ihr Zustand nur unwesentlich, wodurch Fügevorgänge durch Wärmezufuhr wie beim Schweißen nicht ausgemacht werden können. Elastomere sind daher nicht schmelzbar und unlöslich.



Bild: Fahrradschlauch-Armreif aus Gummi (PFFFT)./

Design: Fabian Seibert/  
www.suelzkotlett.de



**Latex**

oder Naturkautschuk ist der milchige Saft tropischer Kautschuk liefernder Pflanzen.



Bild: Tastatur aus elastischem Silikon.



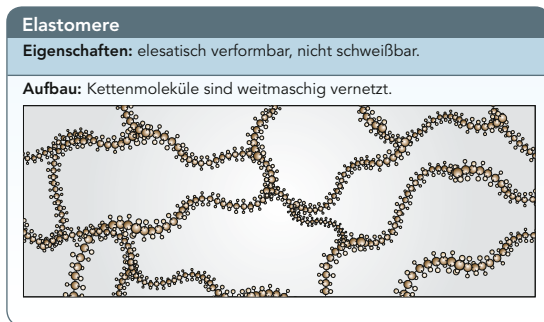


Abb.6: nach [6, 16]

Die Eigenschaften von **Duroplasten** (z.B. Phenolharze, Aminoplaste) sind auf ihre engmaschige und stark vernetzte Polymerstruktur zurückzuführen. Eine Verschiebung der Molekülketten bei Erwärmung ist nahezu ausgeschlossen, da sie sich gegenseitig behindern. Duroplaste können nach der Formgebung lediglich zerspanend bearbeitet werden. Thermisches Verformen, Schmelzen oder Aufquellen sind ausgeschlossen. Typische Vertreter sind beispielsweise Epoxidharze, bei denen die Aushärtung und Formgebung aus den beschriebenen Gründen durch die Zusammenführung der zwei Komponenten meist erst am Einsatzort erfolgt.

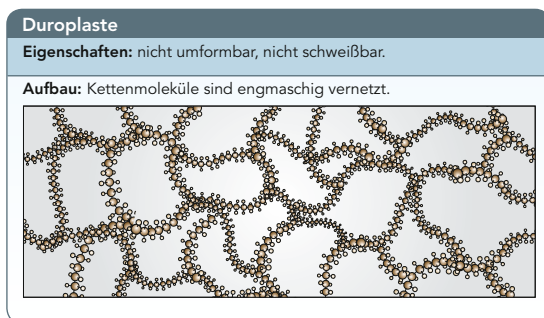


Abb.7: nach [6, 16]

### KUN 1.3

#### Physikalische Eigenschaften

Neben den Verhaltensmustern der unterschiedlichen Kunststofftypen unter Wärmeeinwirkung lassen sich weitere charakteristische Eigenschaften finden, mit denen synthetische Werkstoffe von anderen Materialgruppen abgegrenzt werden können.

Bezeichnend für Kunststoffe ist ihre geringe Dichte. Sie liegt zwischen  $0,9$  und  $2,2 \text{ g/cm}^3$  und damit unter der metallischer Leichtwerkstoffe oder anderer anorganischer Materialien. Da sie aber vergleichsweise dennoch gute mechanische Eigenschaften aufweisen, haben sich Kunststoffe als alternative Leichtbaumaterialien für die Automobil- und Luftfahrtindustrie durchsetzen können.

Bei der Verwendung im industriellen Bereich sind vor allem die im Vergleich zu Metallen geringe Wärmeleitfähigkeit und die Strom isolierenden Eigenschaften von Kunststoffen entscheidende Kriterien. Dies ist auf die sehr niedrige Anzahl freier Elektronen in den molekularen Strukturen synthe-

tischer Werkstoffe zurückzuführen, weswegen sie für Kabelummantelungen und Einhausungen elektrischer Geräte besonders geeignet sind. Die guten Wärmedämmungseigenschaften machen vor allem Schaumstoffplatten für das Baugewerbe bestens geeignet. Thermoplastische Kunststoffe sind in einem engen Temperaturbereich stabil und schmelzen schon bei niedrigen Werten. Tiefe Temperaturen ändern die Gebrauchseigenschaften von Duroplasten kaum, bei Thermoplasten muss mit einer Versprödung gerechnet werden.

Thermische Eigenschaften	
Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$
Polyethylen (PE-LD... PE-HD)	$\lambda \approx 0,3 \dots 0,42 \text{ W/mK}$
Polypropylen (PP)	$\lambda \approx 0,22 \text{ W/mK}$
Polystyrol (PS)	$\lambda \approx 0,17 \text{ W/mK}$
Geschäumtes Polystyrol (EPS)	$\lambda \approx 0,003 \text{ W/mK}$
Quarzporzellan (C110)	$\lambda \approx 1 \dots 2,5 \text{ W/mK}$
Ferrit bzw. Eisen (Fe)	$\lambda \approx 50 \text{ W/mK}$
Aluminium (Al)	$\lambda \approx 204 \text{ W/mK}$
Kupfer (Cu)	$\lambda \approx 384 \text{ W/mK}$

Abb.8: nach [4]

Wie andere Nichtleiter neigen Kunststoffe bei Reibung zu elektrostatischer Aufladung. Dies hat die Anziehung von Staub zur Folge und kann bei einer Funkenentladung Brände und Explosionen auslösen. Je nach Anwendungsfall müssen daher leitende Substanzen beigemischt oder antistatische Beschichtungen aufgebracht werden.

Das akustische Verhalten ist für geschäumte und kompakte Kunststoffe sehr unterschiedlich. Während eine dichte Struktur die Schallausbreitung fördert, sind offenporige Schaumstoffe schallabsorbierend. Die Reflexion von Schallwellen ist auf Grund der geringen Masse von Kunststoffen nahezu ausgeschlossen.

Entscheidend für die Verwendung synthetischer Werkstoffe ist insbesondere die Möglichkeit zur Erzielung hervorragender Oberflächenqualitäten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Oberflächenstruktur formgebender Werkzeuge (z. B. Spritzgießen) nahezu direkt auf das Material übertragen lässt. Sie kann je nach Kunststoffsorte von glatt glänzend bis matt diffus eingestellt werden. Außerdem ist mit amorphen synthetischen Werkstoffen (z. B. PMMA [KUN 4.1.7](#)) eine nahezu glasklare Transparenz erzielbar. Teilkristalline Kunststoffe sind in ihrer Erscheinung opak oder milchig. Durch Zusatz von Farbpigmenten können Kunststoffe beliebig eingefärbt werden. Dies ist sowohl deckend, durchscheinend als auch transparent möglich.

Bild: Kunststoffe können beliebig eingefärbt werden; Plexiglas®, satiniert, transparent und farbig./ Evonik Röhm GmbH



### KUN 1.4 Mechanische Eigenschaften

Je nach Kunststoffsorte können die mechanischen Eigenschaften sehr unterschiedlich ausfallen und auf den jeweiligen Anwendungsfall eingestellt werden. Die Festigkeitswerte sind im Vergleich deutlich niedriger als bei Metallen, können aber durch Faserzusätze [KUN 1.6](#) entscheidend verbessert werden (Moser 1992). Nach Einbettung von Glas- oder Kohlenstofffasern sind sogar Werte erzielbar, die die mechanische Festigkeit von Stählen übersteigt. Die weiteren Einflüsse auf das Eigenschaftsprofil von Kunststoffen können nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Einflüsse von Fasern auf die Eigenschaften von Kunststoffen	
Eigenschaften	Einfluss
Steifigkeit, Festigkeit, Kerbempfindlichkeit, Wärmeformbeständigkeit	steigt
Kriechneigung, Zähigkeit, Wärmeausdehnung, Schwindungsneigung	sinkt

Abb.9: nach [4]

Weitere Charakteristika künstlicher Werkstoffe sind ihre guten Gleit- und Antihafteigenschaften, wodurch die Verwendung beweglicher Bauteile ohne Schmierung möglich ist. Dies trifft vor allem auf technische Kunststoffe wie Polyacetal (POM) [KUN 4.1.5](#) oder Polyamid (PA) [KUN 4.1.6](#) zu, bei denen die Kombination selbstschmierender Eigenschaften und hoher Verschleiß- und Schlagfestigkeit Anwendungen unter dynamischer Belastung rechtfertigen (Domininghaus 1999). Auf Grund der geringen **Laufgeräusche** sind diese Materialien besonders für Zahnräder geeignet.

Durch Wärmezufuhr wird die Dehnbarkeit vor allem thermoplastischer Werkstoffe gesteigert. Die gute Fließfähigkeit dieser Gruppe synthetischer Materialien macht eine kostengünstige Verarbeitung und Formgebung möglich.

### KUN 1.5 Chemische Eigenschaften

Kunststoffe zeichnen sich durch gute Korrosionsbeständigkeit aus. Anders als bei Metallen müssen synthetische Werkstoffe zum Schutz gegen Witterungs- und Umwelteinflüsse weniger stark geschützt werden. Kunststoffe werden daher häufig zur Beschichtung von wenig widerstandsfähigen Werkstoffen verwendet. Die Chemikalienresistenz liegt für die meisten Sorten meist höher als bei Edelstählen. Allerdings sind synthetische Werkstoffe anfällig gegenüber Lösungsmitteln.





Charakteristika und Verwendung von Kunststoffen		
Eigenschaften	Verwendungsbeispiel	
geringe Dichte, bis ca. 1,5 kg/dm <sup>3</sup>	Verpackungen, Raumfahrt, Fahrzeugbau, Flugzeugbau, Leichtbauteile, Ventilatoren	
hart und fest	Maschinenteile, Getriebe	
weich und elastisch	Fahrzeugreifen, Federteile	
gut form- und bearbeitbar	Gehäuse, Chassis	
isolierend: - elektrisch - wärmedämmend - schalldämmend	Werkzeuggriffe, Elektrobauteile, Stecker, Wärmedämmung, Becher, Schaumstoffplatten	
witterungsresistent chemikalienbeständig	Chemiebehälter, Rohre, Armaturen, Bedienelemente, Beschichtungen, Gartengeräte, Fahrzeugbau	

Abb.10: nach [6]

### KUN 1.6 Additive und Faserzumischung

Die Eigenschaften polymerer Werkstoffe lassen sich durch Beimischen von Zusätzen und Hilfsstoffen wie Stabilisatoren, Weichmachern, Füllstoffen, Farb- und Treibmitteln sowie durch Fasermaterialien zum Teil ganz erheblich verbessern. Die Beimischung von Zuschlagstoffen und Additiven wird in der Kunststofftechnik als **Compoundierung** bezeichnet.

Während Stabilisatoren die Witterungsbeständigkeit erhöhen, können Lichtschutzmittel den Einfluss von UV-Strahlungen auf die Materialeigenschaften verringern. Die Beimischung von Treibmitteln ist Voraussetzung zur Herstellung synthetischen Schaumstoffs. Füllstoffe dienen zur Streckung der Kunststoffmenge und verändern das Eigenschaftsprofils. Weichmacher sind die größte Gruppe unter den Additiven. Sie werden zugesetzt, um der Sprödigkeit einiger Kunststoffe entgegenzuwirken, die Neigung zum Bruch bei mechanischer Belastung zu verringern und die plastische Verformbarkeit zu verbessern. Insbesondere zur der Herstellung der weichen Variante von Polyvinylchlorid (PVC) [KUN 4.1.5](#) kommen Weichmacher besonders häufig zum Einsatz. Bei Phthalaten (Weichmacher) werden seit einiger Zeit krebserregende und gesundheitsgefährdende Risiken diskutiert (Emsley 2006). Daher sollte auf den Gebrauch von Weich-PVC für Kinderspielzeug u.ä. verzichtet werden.

Dies trifft vor allem auf die Möglichkeit der Einbettung von Fasern zu, die grundsätzlich für jeden Kunststoff existiert. Sie sind die Festigkeit steigernde Komponente von **Faserverbundwerkstoffen** [VER](#). Als Resultat entstehen Konstruktionswerkstoffe, die die positiven Eigenschaften (z. B. geringe Dichte) und die leichte Verarbeitbarkeit von Kunststoffen mit der hohen Festigkeit des Fasermaterials vereinen. Nachteilige Charakteristika werden durch das Profil des jeweiligen Partners überdeckt. Ein Faseranteil von 30–50 % ist durchaus üblich. Man unterscheidet **Endlos-, Lang- und Kurzfasern**.

Während Endlos- und Langfasern in Kombination mit duroplastischen Reaktionsharzen angewendet werden, sind Kurzfasern zur Verstärkung thermoplastischer Kunststoffe im Einsatz. Hinweise zur Dimensionierung von Faserverbundkunststoffen werden in Michaeli et al. 1995 gegeben.



Abb.11: nach [6]

Auf Grund der guten mechanischen Eigenschaften und des niedrigen Preises sind **Glasfasern** <sup>GLA 4.7</sup> das wichtigste Fasermaterial zur Verstärkung von Kunststoffen. Sie verfügen über hohe Zugfestigkeit (bis 2400 N/mm<sup>2</sup>) und geringe Dichte (etwa 2,6 g/cm<sup>3</sup>). Die Sprödigkeit wird im Verbund durch die Zähigkeit des Kunststoffes ausgeglichen. Glasfasern liegen für eine Verarbeitung in Form von Rovings (grobes Gewebe), Gelegen, Matten, Strängen oder Faserrollen vor. Verbundwerkstoffe mit Glasfasern werden als »GFK« oder glasfaserverstärkte Kunststoffe bezeichnet.

**Aramidfasern** haben etwa die gleiche Festigkeit wie Glasfasern, sind aber sehr viel dehnfähiger und damit zäher <sup>TEX 4.4.2</sup>. Zudem sind sie nur schwer entflammbar, schmelzen nicht und sind bis zu einer Temperatur von 160°C formbeständig. Sie werden zur Vermeidung von Splitterungen für schlag- und stoßbeanspruchte Bauteile im Flugzeugcockpit oder in schusssicheren Westen verwendet. Mit Aramidfasern verstärkte Verbundwerkstoffe sind kostspielig und unter der Abkürzung »RFK« im Markt erhältlich. DuPont vertreibt sie unter dem Handelsnamen Kevlar®.

Da sich faserverstärkte Kunststoffe wegen der Materialmischung nur schwer recyceln lassen, werden zur Verbesserung des Eigenschaftsprofils immer häufiger **Pflanzenfasern** (Flachs, Hanf, Kokos, Bambus, Holz) genutzt. Diese weisen zwar keine so hohen Festigkeiten wie Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern auf, sind aber leichter zu entsorgen, geräusch- und wärmedämmend und atmungsaktiv. Anwendungsbeispiele sind Schutzhelme oder Pkw-Innenverkleidungen.

Einflüsse von Füllstoffen auf die Kunststoffeigenschaften												
Form des Füllstoffs:	Fasern			Platten			Kugeln					
Füllstoff	Cellulose	C-Fasern	Textilglas	Synthesefasern	Whiskers	Wollastonit	Glimmer	Talkum	Glas-Kugeln	Kalkiumkarbonat	Kaolin	Metalloxide
Eigenschaften												
Zugfestigkeit	↗	↑										
Druckfestigkeit			↗						↗	↗	↗	↗
E-Modul		↑	↑	↗	↑	↑	↑	↑	↗	↗	↗	↗
Schlagzähigkeit	↗	↗	↗	↑	↗				↗	↗	↗	↗
Abriebverhalten		↗					↗	↗				
Wärmeleitfähigkeit	↑	↗					↗	↗	↗	↗		↗
Wärmestandfestigkeit		↑	↑				↗	↗	↗	↗	↗	↗
Wärmebeständigkeit							↗	↗	↗	↗	↗	↗
thermische Ausdehnung				↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
elektrische Leitfähigkeit	↑		↗				↗	↗				↗
elektrischer Widerstand							↑	↗		↑	↗	↗
chemische Beständigkeit							↗	↗	↗	↗	↗	↗
Extrusionsgeschwindigkeit									↗	↗	↗	↗
Abrasion in Maschinen		↗	↗	↗	↗			↗	↗	↗	↗	↗
Schwindung		↗	↗	↗	↗			↗	↗	↗	↗	↗
Kostenreduzierung	€	↗	↗	↗	↗			↗	↗	↗	↗	↗
Verbesserung sehr gut: ↑	gut: ↗ keine Veränderung: ● schlechter: ↘											

Abb.12: nach [40]

### Lieferformen von Fasermaterialien

Je nach Anwendungsfall und Verarbeitungsmethode sind unterschiedliche Faserformen auf dem Markt erhältlich:

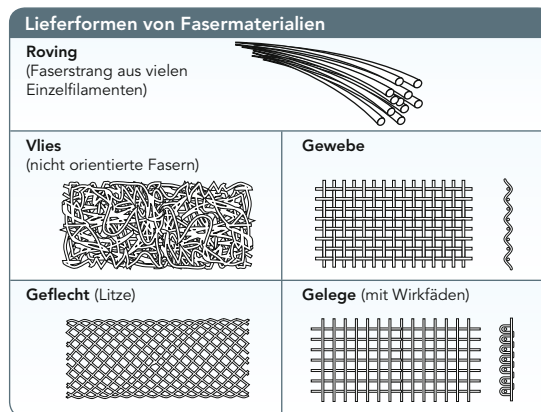


Abb.13: nach [27]

Mit **Rovings** werden Faserstränge bezeichnet, die aus parallel nebeneinander liegenden, nicht miteinander versponnenen Fasern bestehen. Diese weisen einen Durchmesser von etwa 1 mm auf und finden in der **Faserwickeltechnik** <sup>KUN 2.2</sup> häufig Verwendung. Das Auseinanderziehen oder die Verstreckung wirken sich während der Verarbeitung positiv auf das Ergebnis aus.

Bild unten rechts: Surfbrettfinne aus GFK.





**Vliese** sind Matten aus völlig ungeordneten, wirt zusammengelegten Fasern, die auch unter der Bezeichnung **Wirrglas** bekannt sind. Die Verarbeitung ist einfach. Jedoch sind die erreichbaren Festigkeitswerte eher niedrig.

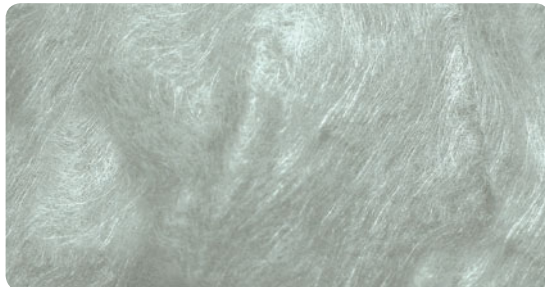


Bild: Glasfaservlies.

Die teuren **Kohlenstofffasern** werden für spezielle Einsatzfälle im Flugzeugbau oder in der Raumfahrt verwendet, wo die Festigkeitswerte von Glas- oder Aramidfasern nicht mehr ausreichen. Kohlefasern weisen Zugfestigkeiten bis  $3.600 \text{ N/mm}^2$  auf, wodurch beispielsweise der Bau von Tragflügelprofilen mit sehr geringen Bauhöhen für Segelflugzeuge möglich ist. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe sind unter dem Namen »CFK« bekannt.

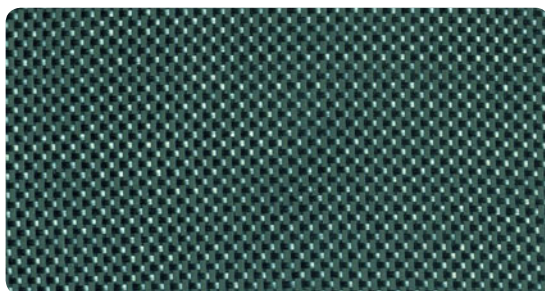


Bild: Kohlenstofffasern (Karbonfasern)

Bild unten: Die oben gezeigten GFK-Hauben im fertigen Zustand./ TÜNKERS Maschinenbau GmbH/

Foto: Herf & Braun

Design: UNITEDDESIGNWORKERS.com



Bei **Gewebe** oder **Geflecht** sind die Faserstränge miteinander in geordneter Form verwoben. Auf Grund der universellen Einsetzbarkeit und der leichten Verarbeitung sind Gewebe die am häufigsten genutzte Faserform. Auch komplizierte Formgeometrien lassen sich realisieren. Selbst beim Handlaminieren können enge Wölbungen sehr gut angepasst werden.

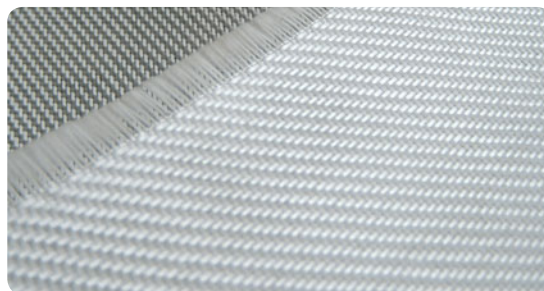


Bild: Glasfasergewebe.



Bild: Glasfaserverstärkte Kunststoffhaube.

Ein **Gelege** ist eine Zwischenform zwischen einem Roving und einem Gewebe. Die einzelnen Faserstränge sind parallel in einzelne Schichten gelegt und werden lediglich mit dünnen Fäden zusammengehalten.

Vor allem beim **Handlaminieren** <sup>KUN 2.2</sup> können Gelege im Vergleich zu Rovings leichter positioniert und verarbeitet werden. Mehrere Verstärkungsrichtungen sind erzielbar.

Von **Prepags** spricht man, wenn die beschriebenen Faserformen nicht trocken, sondern schon mit einem Spezialharz imprägniert bezogen werden. Die Aushärtung des Fasermaterials erfolgt unter Wärmezufuhr.

## KUN 2

### Prinzipien und Eigenheiten der Kunststoffverarbeitung

Mit der Einteilung der Kunststoffe in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste wurden die wesentlichen Unterschiede in der Verarbeitung vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Verhaltens bei Erwärmung bereits beschrieben. Die Formgebungsmöglichkeiten sind sehr stark mit diesen Eigenschaften verbunden.

#### Bindenähte

Beim Gießen thermoplastischer Kunststoffe muss auf die Bildung von Bindenähten geachtet werden. Diese entstehen während der Formfüllung, wenn das plastifizierte Material auf Grund von Durchbrüchen oder Innenstrukturen getrennt wird und hinterher wieder zusammenfließt. Die Schmelzfronten haben sich in der Zwischenzeit auf molekularer Ebene bereits orientiert und können keine homogene Struktur mehr bilden. Bindenähte stellen Bauteilchwachstellen dar, an denen das Material unter Belastung schnell nachgibt und reißt. Eine intelligente Positionierung des Angusskanals beim Formenbau kann Länge und Anzahl von Bindenähten reduzieren helfen. Eine Verfestigung der betroffenen Stellen durch lange Abkühlzeiten kann die negativen Auswirkungen von Bindenähten verringern.

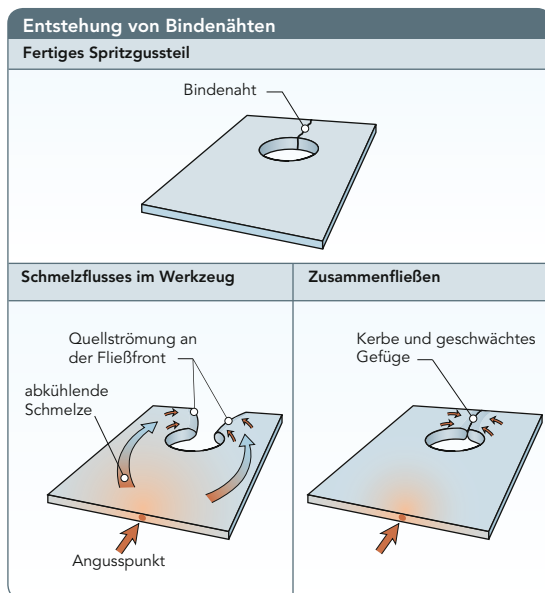


Abb.14: nach [4]



Bild: Unschöne Bindenähte im sichtbaren Bereich der Bauteiloberfläche, Anguss ist hier im Bild unten rechts.

## Formen

**Thermoplaste** bieten auf Grund der Verflüssigungsmöglichkeit unter Wärme die besten Verarbeitungsoptionen. **Spritzgießen** <sup>FOR 1.2</sup> und **Extrusion** <sup>FOR 4.1</sup> sind die üblichen Verfahren zur Massproduktion von Kunststoffbauteilen. Granulat oder Pulver wird als Ausgangsstoff unter hohen Temperaturen plastifiziert und in Formen gespritzt bzw. gepresst oder in einem Extruder zu Halbzeugen, Platten oder Folien geformt. Weitere Massenverfahren zur Formgebung thermoplastischer Kunststoffe sind das **Blasformen** <sup>FOR 5.3</sup>, **Pressen** <sup>FOR 6.4</sup> oder das **Schleuder- und Rotationsgießen** <sup>FOR 1.6</sup>. Duroplastische Formmassen werden durch Pressformen <sup>FOR 6.4</sup> verarbeitet.

Die meisten synthetischen Werkstoffe können auch zu **Polymerschäumen** <sup>FOR 3</sup> geschäumt werden. Hier sind vor allem die Kunststoffe PE, PP, PS oder PUR zu nennen. Zur Herstellung von Bauteilen in kleinen und mittleren Stückzahlen steht das **Polymer** <sup>FOR 1.8</sup> oder **Vakuumgießen** <sup>FOR 1.5</sup> zur Verfügung.

**Elastomere** und **duroplastische** Formmassen können nur vor der eigentlichen polymeren Vernetzung formgebend verarbeitet werden. Eine nachträgliche Verflüssigung durch Erwärmung ist nicht möglich. Die Grundwerkstoffe werden in eine Form gegossen oder als Festmassen in die gewünschte Geometrie gepresst (z. B. Pressformen) und abschließend ausgehärtet.

## Umformen

Lediglich thermoplastische Kunststoffe können unter Einbringung von Wärme umgeformt werden. Die Werkstoffe werden hierzu bis zum Erweichen erhitzt. Platten oder Stabmaterial werden durch Warmumformen vor allem dann bearbeitet, wenn eine zweidimensionale Bauteilgeometrie erforderlich ist oder Formveränderungen durch einfaches Biegen möglich ist. Die Herstellung der Werkzeugform ist bei diesen Verfahren preisgünstig. Der Herstellungsprozess von Folien in **Walzwerken** unter Druck und Wärme wird **Kalandrieren** <sup>FOR 4</sup> genannt (Nentwig 1994). Wenn hohe Stückzahlen die Werkzeugkosten rechtfertigen, kann bei einfachen Geometrien (z. B. Joghurtbecher) das **Thermoformen** <sup>FOR 7.1</sup>, **Tiefziehen** <sup>FOR 7.1</sup> oder **Blasformen** <sup>FOR 5.3</sup> auch in drei Dimensionen erfolgen (Ruge, Wohlfahrt 2001).

Umformtemperaturen verschiedener Kunststoffe	
Material	Umformtemperaturbereich
ABS	100 ... 150 °C
Celluloseacetobutyrat (CAB)	180 ... 200 °C
Polycarbonat (PC)	150 ... 210 °C
Polyethylen (PE)	140 ... 160 °C
Polyethylenterephthalat (PET)	120 ... 160 °C
Polymethylmethacrylat (PMMA)	130 ... 170 °C
Polypropylen (PP)	155 ... 200 °C
Polystyrol (PS)	130 ... 200 °C
Polyvinylchlorid (PVC-hart)	90 ... 150 °C

Abb. 15: nach [3, 46]

Handbuch für Technisches Produktdesign  
Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für  
Designer und Ingenieure  
Kalweit, A.; Paul, C.; Peters, S.; Wallbaum, R. (Hrsg.)  
2012, XXIX, 608 S. 1500 Abb., 700 Abb. in Farbe.,  
Hardcover  
ISBN: 978-3-642-02641-6