

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Geschichte, Begriffe

Kunststoffe, Plaste, Hochpolymere, engl: plastic

Vorletztes Jahrhundert wurden natürliche Materialien als Ausgangspunkt für neue, „künstliche“ Stoffe verwendet. Daher der Begriff Kunststoff.

Kunststoffe sind hochmolekulare Verbindungen aus Makromolekülen, also Riesenmolekülen, basierend auf Grundmolekülen, den Monomeren.

Der Begriff Makromoleküle wurde 1926 von Prof. Staudinger eingeführt.

Kunststoffe entstehen auf Basis natürlicher Rohstoffe oder durch Synthese von Primärstoffen wie Erdöl, Erdgas oder Kohle. Natürliche Ausgangsprodukte sind

- Zellulose (Holz, Holzschliff) für Zellulosederivate (=Abkömmlinge: Zellglas, Zellwolle)
- plastifiziertes und gehärtetes Milcheiweiß (Kasein) für Kunsthorn
- Öle, Harze (Naturharze, Pflanzenöle) als Ausgangsstoffe für die Lackindustrie.

Im geschichtlichen Abriss ist zwischen der Laborentwicklung und der Massenproduktion zu unterscheiden. Dies führt auch zu teilweise unterschiedlichen Angaben

19. Jh.	Zelluloseveredlung	
1869	Zelluloid	durch J.W.Hyatt
1900	Kunsthorn	Weltkunststoffproduktion 2000t
1905	Zelluloseazetat (Celluloseacetat)	erster Kunststoff in Spritzguß (1926) Eckert & Ziegler
1911	Zellglas	grosstechnisch, Cellophan 1905 erfunden, 1908 Patent
1907-9	Phenolharze	Dr. Baekeland Patent für ersten vollsynthetischen Kunststoff. Nach ihm „Bakelite“ benannt
1912	PVC	durch Klatte
1930	PS, PAN	
1931	PIB	
1935	PE	
1936	PVC	grosstechnisch
1936 Weltkunststoffproduktion 1. Platz Phenolharze, aber zunehmend werden mehr Thermoplaste als Duroplaste produziert, sowie die Palette ständig erweitert.		
1937	PA6, PVA, PUR	PA: Nylon, Perlon = Faser (Strümpfe)
1950	Flourkunststoffe	
1953	PC, PE-ND	
1957	PP	
1965	PSU	
1971	PPS	
1982	PEI	
2000	elektrische Kunstst.	

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Neuere Meldungen

Kunststoffe zeichnen sich durch eine zunehmende Vielfalt aus (z.B. leitend – nicht leitend) als Ergebnis zielgerichteter Forschung. Dazu nachfolgende Meldungen

#### **„Baumwollplastik“** August 2008

Kunststofffolien aus nachwachsenden Rohstoffen (nordamerikanische Bohnen, Baumwolle aus Altkleidern) für Solarzellen

#### **„Pioneer entwickelt biologisch abbaubaren optischen Datenträger“**, November 2004

Optischer Datenträger aus Maisstärke (statt sonst PC); kompostierbar und mit Hilfe von Bakterien vollständig abbaubar

#### **„Neuer elektrisch leitender Kunststoff entwickelt“**, April 2004

Oligotron ist löslich und wichtig für Organic Light-Emitting-Diodes (OLED)

#### **„NEC entwickelt flammwidrigen Bio-Kunststoff“**, Januar 2004

auf Biomassebasis (Polylaktatsäure); flammwidrig; erfüllt Normen für Einsatz in Bürogeräten

#### **„Experte: Plastik-Chips machen Silizium immer mehr Konkurrenz“**, Mai 2002

Leuchtende und elektrisch leitfähige Kunststoffe statt teurem Silizium

#### **„Magnetischer Kunststoff“**, November 2001

nichtmetallische magnetische Werkstoffe sparen in elektronischen Geräten Gewicht und Kosten

#### **„Supraleitender Kunststoff“**, März 2001

Kunststoffe (die eigentlich isolierend sind) können nun auch nicht nur leitend, sondern sogar supraleitend hergestellt werden; supraleitend bedeutet, daß der Strom ohne elektrischen Widerstand transportiert wird, was sonst nur (stark gekühlte) Metalle vermögen

#### **„Nachwachsende Kunststoffe“**, Februar 2001

Kunststoffe, die sich selber regenerieren; (dies darf nicht verwechselt werden mit Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe)

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Systematik

Kunststoffe können unterschiedlich systematisiert werden.

**Ausgangsprodukte:** natürliche oder synthetische Rohstoffe.

**Abbaubarkeit:** nicht biologisch abbaubar oder abbaubar/kompostierbar.

**Dichte:** Für eine Grobbestimmung eines unbekanntes Kunststoffes kann seine Dichte von Bedeutung sein: ist diese kleiner 1 schwimmt der Kunststoff, andernfalls geht er unter. Zu den Kunststoffen mit einer Dichte kleiner 1 gehören die Polyolefine (PP, PE).

**Transparenz:** Kunststoffe können durchsichtig, undurchsichtig und opak sein.

### Verhalten bei Wärme

Thermoplaste	Duroplaste
Bei Gebrauchstemperatur fest oder gummiartig und bei Erwärmung plastisch verformbar. Nach Abkühlung ist der Ausgangszustand wieder erreicht. Die Formgebung bzw. Umformung ist <b>mehrmals</b> möglich.	Mit der chemischen Reaktion der Ausgangsstoffe (meist unter Druck und Wärme) wird ein unlösbares und unschmelzbares Endprodukt erreicht. Es findet eine <b>einmalige</b> , irreversible Formgebung statt.

Kunststoffe lassen sich nach der Art der **Synthese** unterscheiden

Thermoplaste	Duroplaste	Elastomere
sind kettenförmig, eindimensional oder verzweigt	sind netzförmig und eng verknüpft. Daraus resultiert die Temperaturbeständigkeit und die oben erwähnte Unlösbarkeit/Unschmelzbarkeit	sind weitmaschig verknüpfte Moleküle

Bei der Synthese finden unterschiedliche chemische Prozesse statt

Polymerisation	Polyaddition	Polykondensation
Polymerisation ist die Zusammenlagerung einfacherer chemischer Verbindungen (=Monomere) zu polymeren, kettenförmigen Großmolekülen (=Makromolekülen), z.B. Ethylen zu Polyethylen (PE).	Polyaddition ist die chemische Verknüpfung einfacherer chemischer Verbindungen durch Reaktion zwischen funktionalen Gruppen zu polymeren Molekülen. Es treten andere Verknüpfungsmechanismen auf und es werden keine niedrigmolekularen Verbindungen (Nebenprodukte) abgespaltet.	Polykondensation ist die chemische Verknüpfung einfacherer chemischer Verbindungen unter Abspaltung von Nebenprodukten (Wasser oder andere kleine Moleküle) zu polymeren Molekülen.
PE, PP, PS, PVC, PAN, PMMA, PTFE, Polybutadien (Buna)	EP, PUR, (Polyharnstoffe)	PA, PET (Polyester), Formaldehydharze

Kunststoffe lassen sich ferner nach ihrem Produktionsumfang bzw. nach ihrer Leistungsfähigkeit einordnen

Standardkunststoffe	Technische Kunststoffe	Hochleistungskunststoffe
PE- LD, PE-HD, PP, PS, EPS (= schäumbares PS), PVC	PA, PMMA, PC, ABS, SAN, PET, PBT, POM, Polymerblends/Compounds	Fluorkunststoffe, PSU, PEEK, PPS (= Polyphenylsulfid), PPE (= Polyphenylenether)

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Kennzeichnung, Namensgebung

Kunststoffe haben eine Bezeichnung nach dem **chemischen Aufbau**. Darauf basiert eine Abkürzung, die auch auf englischsprachigen Begriffen beruhen kann. Diese Abkürzung kann erweitert werden, z.B. wenn Füllstoffe oder ein Prozentsatz Glasfasern enthalten sind.

Ferner gibt es Verbindungen mehrerer Kunststoffe, sogenannte Compounds.

Herstellerfirmen von Kunststoffen geben ihren Erzeugnissen **Handelsnamen**.

Kunststoffe können als Massivmaterial und vielfach auch als Schaum mit einer spezifisch geringeren Dichte auftreten. Die Abkürzungen geben noch keinen Aufschluss über Lieferformen (Granulat, Halbzeuge,...), spezielle Ausrichtungen auf Urformverfahren (Spritzguß, Blasformen,...) oder spezielle Zusätze (Flammhemmend, UV-Beständigkeit,...).

Chemische Bezeichnung	Abkürzung	Handelsnamen (Auswahl)
Polyamid 6,6 mit 30% Glasfaserverstärkung	PA 6,6 30%GF	Akulon S, Ultramid A, Zytel
Polymethylmethacrylat	PMMA	Plexiglas bzw. allg. Acrylglas

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

Kurzzeichen ausgewählter Kunststoffe nach DIN EN ISO 1043-1

Chemischer Aufbau	Kurzzeichen
Celluloseacetat	CA
Celluloseacetatbutyrat	CAB
Cellulosenitrat	CN
Ethylen-Tetrafluorethylen	ETFE
Polyamid (gefolgt von Ziffern, z.B. PA6,11,12,66)	PA..
Polyacrylnitril	PAN
Polybuthylenterephthalat	PBT
Polycarbonat	PC
Polyethylen - niedriger Dichte	PE-LD (PE-ND)
- niedriger Dichte linear	PE-LLD
- mittlerer Dichte	PE-MD (PE-MD)
- hoher Dichte	PE-HD (PE-HD)
Polyetherimid	PEI
Polyetheetherketon	PEEK
Polyethersulfon	PESU
Polyethylenterephthalat	PET
Polyimid	PI
Polyisobuten	PIB
Polymethylmethacrylat	PMMA
Polyoximethylen, Polyacetal	POM
Polypropylen	PP
Polyphenylsulfid	PPS
Polystyrol	PS
Polysulfon	PSU
Polytetrafluorethylen	PTFE
Polyurethan	PUR
Polyvinylacetat	PVAC
Polyvinylalkohol	PVAL (auch PVA)
Polyvinylchlorid - unplasticized/weichmacherfrei=hart	PVC-U (PVC-H)
- plasticized/weich	PVC-P (PVC-W)
Silikon	SI
Styrol-Acrylnitril (Copolymer)	SAN
Acrylnitril-Butadien-Styrol (Copolymer)	ABS
Ethylen-Vinylacetat (Copolymer)	EVA
Epoxidharz	EP
Harnstoff-Formaldehyd	UF
Melamin-Formaldehyd	MF
Phenol-Formaldehyd	PF
Ungesättigtes Polyesterharz	UP

Polyurethan (PUR) kann duroplastisch sein, thermoplastisch verarbeitbar (TPU), Elastomer oder mehrere Arten von Schäumen bilden.

Im Internet gibt es diverse Verzeichnisse von Handelsnamen. In der **Hochschulbibliothek** ist der Zugang vorhanden zum « **Material Data Center** » der Firma « M-Base ». In der Lizenz enthalten ist auch der Zugang zum Handelsnamenverzeichnis. Dort können Informationen zu einem vorhandenen Handelsnamen abgerufen oder bei der Suche nach einem Hersteller, der Polymergruppe oder der Lieferform die möglichen Handelsnamen aufgelistet werden incl. Detailinformationen.

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Isolationsverhalten

Kunststoffe sind im Normalfall elektrische Isolatoren mit einem Oberflächenwiderstand bis zu  $10^{17} \Omega$  (z.B. PTFE).

Durch Reibung (bei der Herstellung und Benutzung) kommt es zu Ladungsverschiebungen (Elektronenmangel und -überschuss). Der Oberflächenwiderstand verhindert einen Ladungsausgleich und es entsteht eine elektrostatische Aufladung.

Staub wird angezogen und der Werkstoff verschmutzt. Im Extremfall kann es zu Funkenbildung und Feuer kommen. Ferner bei Berührung zu einem als unangenehm empfundenen elektrischen Schlag.

Wie kann dies verhindert werden?

- Wahl eines geeigneteren Kunststoffes, z.B. PA statt PVC, PS
- Einsatz von Antistatika (z.B. leitende Füllstoffe, leitende Spritzlacke), die die Ladung über die gesamte Oberfläche gleichmäßig verteilen bzw. diese an die in der umgebenden Luft enthaltenen Feuchtigkeit ableiten

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Vergleich Kunststoffe - Metalle

Beide Werkstoffgruppen beinhalten sehr unterschiedliche Materialien. Besonders bei den Kunststoffen variieren die Eigenschaften breit, schon allein durch die Unterscheidung in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Ferner sind Anpassungen an Fertigungsverfahren und geforderte Eigenschaftsprofile durch Zusätze möglich (Verstärkungs- und Füllstoffe).

Trotzdem lassen sich einige grundlegende **Vergleiche** anstellen und **Grenzen** definieren.

#### Grenzen – permanent

- verhältnismäßig enger Temperatureinsatzbereich
- Alterungsverhalten
- relativ kleine Festigkeit und niedriger E-Modul (Ausnahmen sind gegeben)
- visko-elastisches Verhalten abhängig von Rahmenbedingungen (stofflich, Verarbeitung, Umwelt)
- linearer Wärmeausdehnungskoeffizient groß; Wärmeleitfähigkeit klein
- elektrostatisches Aufladevermögen (Verschmutzung, Verstauben)

#### Grenzen – zeitweilig

- Ökonomie (Preisgefüge, Verfügbarkeit)
- Fertigungsverfahren (Maschinen, Werkzeuge)

Höher / Größer / Vorteilhafter bei Metallen	Größer / Vorteilhafter bei Kunststoffen
- Dichte (ggf. nachteilig)	- Korrosionsbeständigkeit
- Steifigkeit - Festigkeit	- Isolationswerte
- meist nicht brennbar	- Wärmeausdehnung
- Alterungsanfälligkeit geringer	- Mechanische Dämpfung
- Maximale Gebrauchstemperatur	- gute durchgehende Einfärbbarkeit
- Temperaturleitfähigkeit	- meist physiologisch unbedenklich, geschmacks- und geruchsneutral
- Elektrische Leitfähigkeit	- dichte, glatte, geschlossene Oberfläche
	- effizientes Urformen großer Stückzahlen idealer Weise ohne Nachbearbeitung
	- zeitabhängige (viskose) und zeitunabhängige (elastische) Verformungen (nachteilig)
	- Reißdehnung
	- Zähigkeit
	- Feuchtigkeitsaufnahme (z.B. Luftfeuchtigkeit) führt zu Maßänderungen (PA)

	Kunststoffe	Metalle
Dichte $\rho$ [g / cm <sup>3</sup> ]	<b>0,8 bis 2,2...2,3</b> leichter Wasser; schwimmfähig bis PTFE und verstärkte Duroplaste; Schaumstoffe sind hier nicht berücksichtigt!	Stahl...7,85 Aluminium 2,7
Elastizitätsmodul E-Modul E [N / mm <sup>2</sup> ]	<b>1000 bis ca. 40000</b> Thermoplaste bis GUP-Roving 75%; zeitlich veränderliches Verhalten (viskoelastisches Verhalten) <b>Kriechmodul</b> → zeitabhängiger Modul bei konstanter Belastung; <b>Relaxationsmodul</b> → zeitabhängiger Modul bei konstanter Deformation  E-Modul abhängig von Belastungszeit, Deformationszeit, Belastungshöhe, Temperatur  Kleiner E-Modul von Kunststoffen: flexible, schwingungs- und geräuschkämpfende Konstruktionselemente	Stahl 210000 Aluminium 70000
Festigkeit Spannung $\sigma$ [N / mm <sup>2</sup> ] (Streckgrenze, Zugfestigkeit, ...)	<b>10...100 fach geringer</b> lediglich verstärkte Duroplaste ähnlich Metalle  analog zu E-Modul Abhängigkeit von Zeit und Umwelt	
Dauergebrauchs- temperatur	bei erhöhten Temperaturen erweichen Thermoplaste und viskoses Kriechen nimmt zu; bei Kälte Versprödung	mech. Eigenschaften konstant von ca. 250...376K
Elektrische Eigenschaften	hochwertige Isolierstoffe, aber auch leitfähige Kunststoffe möglich; Isolierverhalten beeinflussbar (Füllstoffe, Weichmacher)	
Chemische Beständigkeit (Korrosions- beständigkeit)	große chemische Beständigkeit; da Kunststoffe keine Ionenbindungen besitzen ist Korrosion durch elektrochemische Vorgänge nicht möglich; ABER: Spannungsrisskorrosion, d.h. Bruch durch kombiniertes Einwirken von Spannungen (innere Orientierungs- und Abkühlungsspannungen bzw. äußere Spannungen) und Flüssigkeiten / Dämpfe; Ausgangspunkt z.B. Haarriss → klaffender Riss → Bruch	
Temperaturleitfähigkeit	geringer als bei Metallen	
lineare Wärmedehnung (Längenausdehnungs- koeffizient) $10^{-6}$ /K	<b>10...250</b> besonders hoch bei PE	Stahl 13, Holz 8, Glas 10, Alumin. 23
Oberflächenwiderst. $\Omega$	<b>...10<sup>17</sup></b>	

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Recycling

Vermeiden – Sammeln – Trennen – Verwerten

### Trennen

Für die nachfolgende Verwertung ist homogenes, rieselfähiges Schüttgut mit hoher Dichte und geringer Feuchtigkeit sowie geringem Fremdmaterial erforderlich. Dazu werden verschiedenen Verfahren verwendet. Problematisch ist der hohe Anteil von Mischkunststoffen (1998: 63%; 2000: 64%; 2003: 64% also annähernd gleichbleibend).

- **Hydrozyklonverfahren**  
In einem wassergefüllten Zylinder werden die Kunststoffabfälle herum gewirbelt. Infolge ihres unterschiedlichen spezifischen Gewichts bewegt sich die Schwerfraktion nach außen und treibt somit die Leichtfraktion nach innen, wo sie über ein Rohr abgesaugt wird
  
- **Schwimm-Sink-Verfahren**  
Zerkleinerte und durchmischte Kunststoffe trennen sich im Wasser durch ihr unterschiedliches spezifisches Gewicht in eine Leicht- und Schwerfraktion (Beispiel: PE, PP [Polyolefine] schwimmen; PS, PVC sinkt)
  
- **Zentrifugensortierung**  
Ähnlich den oben beschriebenen Verfahren für zerkleinerte Kunststoffverpackungen, die in einer zylindrischen Zentrifuge mit beschleunigtem Wasser getrennt werden
  
- **Infrarotsortierung**  
Kunststoffe werden mit Infrarotlicht bestrahlt, das je nach Werkstoff unterschiedlich reflektiert und von Sensoren erfasst wird. Dadurch ist eine sortenreine Sortierung möglich.

## Verwerten

Die möglichst sortenrein getrennten Kunststoffe können unterschiedlich verwertet und somit wieder dem Wirtschaftskreislauf zugeführt werden. Besonders bei der werkstofflichen Verwertung ist Stoffreinheit unabdingbar.

### - **Werkstoffliche Verwertung**

Nach erfolgter Sortierung kann das erzeugte Regranulat weiter verarbeitet werden. Je reiner es ist um so eher kann es mit Primärmaterial konkurrieren, d.h. um so größer ist der Wertschöpfungsprozess („Abfall“ – Ausgangsmaterial für neue Produkte). Verwendete Verfahren sind:

- o Extrusion
- o Folienblasen
- o Spritzguss
- o Pressverfahren
- o **Intrusion** (vermischte, fein gemahlene Kunststoffpartikel werden zu einer plastischen Masse aufgeschmolzen, die direkt in eine Form gepresst wird: Verkehrsinseln, Rasengittersteine, Fensterprofile)

### - **Rohstoffliche Verwertung**

Wie der Name schon sagt werden aus den (komplexen) Kunststoffen wieder Ausgangsstoffe wie Öl oder Gas erzeugt. Diese können nochmals in die Kunststoffproduktion einfließen oder auch als Schwerölersatz in die Stahlproduktion.

- o **Hydrierung**  
Analog den seit Anfang des letzten Jahrhunderts bekannten Verfahren zur Kohleverflüssigung werden Kunststoffe bei Temperaturen von 350...400° verflüssigt, gereinigt und in einer zweiten Phase (der Hydrierung) weiter aufgespalten und bearbeitet. Ergebnis ist synthetisches Rohöl (Syncrude) sowie in geringem Anteil Gas. Aus 1 Tonne Altkunststoff entstehen 800 kg Syncrude.
- o **Thermolyse**  
Die Kunststoffe werden verflüssigt, „gecrackt“ und fraktioniert (getrennt), wobei Naphta, Aromate (Ausgangsstoff für Kunststoffe) und Synthesegas entstehen.
- o **Synthesegaserzeugung**  
Bei 800° werden die Kunststoffe zu einem Gasgemisch verarbeitet, das wiederum Ausgangspunkt für chemische Produkte ist.
- o **Reduktionsverfahren**  
Das Verfahren ersetzt in der Roheisengewinnung 1:1 das bisher verwendete Schweröl durch aufbereitetes Mischkunststoffe (Agglomerat). Dieser Ersatz ist ökologisch unbedenklich.

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Biokunststoffe und Biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)

Kunststoffe sind dann biologisch abbaubar, wenn sie in normalen Kompostierungsprozessen (Komposthaufen, Erdreich) innerhalb einiger Wochen (45..80 Tage je nach Temperatur u.ä.) ohne Rückstände zu hinterlassen abgebaut werden.

Die mögliche **Ausgangsbasis** für biologisch abbaubare Kunststoffe kann vielfältig sein.

- Stärke: In Frage kommende Pflanzen zur Stärkegewinnung sind:
  - Kartoffeln (wichtigster Stärkelieferant in Deutschland)
  - Weizen
  - Mais
  - Erbsen (Markerbsen)
- Cellulose: Basis für Celluloseester und Cellophanfolie (Zellglas)
- Zucker: (Saccharose) aus Zuckerrüben oder Zuckerrohr
- Sonstige: Kasein (Protein aus Magermilch), Chitin, Gelantine, Proteine (aus Weizen oder Mais)

In der Weiterverarbeitung werden bspw. hergestellt:

- Thermoplastische Stärke (enthält zusätzlich natürlichen Weichmacher und Plastifizierungsmittel [Glycerin, Sorbitol])
- Milchsäure (Zwischenprodukt aus Zucker und Stärke und Basis für Polylactid [PLA])
- Kunststoffblends

Ferner gibt es vollsynthetische biologisch abbaubare Werkstoffe, z.B. Polycaprolacton (PCL). Ebenso auf Basis fossiler Rohstoffe.

Am Markt existieren Serienprodukte, beispielsweise **Folien**, die in der Verarbeitung und Handhabung Polyethylen (PE-LD) ähneln und somit den Umstieg erleichtern:

- Auf vorhandenen Maschinen verarbeitbar
- Wasserfest, reißfest, elastisch, bedruckbar, schweißbar
- Auch einsetzbar im Verbund mit Papier

Als **Beschichtung** im Zusammenspiel mit ebenfalls biologisch abbaubaren Stärkeschaumverpackungen, die dadurch vor mechanischen Beschädigungen wie Brüchen und Rissen geschützt werden.

Wichtigstes Anwendungsgebiet ist wie oben schon erwähnt die Verpackungsindustrie:

- Trink- und Joghurtbecher
- Geschirr
- Flaschen, Kanister
- Tragetaschen
- Klarsichtpackungen

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Naturfasern und Naturfaserverbunde (Biocomposites)

Nachwachsende Rohstoffe sind vielfältig im Zusammenhang mit klassischen Kunststoffen (UP-/EP-Harze u.ä.) zu verwenden, z.B. als Fasern zur Verstärkung. Es entstehen Verbundwerkstoffe, bei denen beispielsweise Glasfasern ersetzt werden. Der volle ökologische Effekt wird erzielt, wenn auch die Matrix biopolymer ist, also aus Zellulose- oder Stärkederivaten besteht. Dann kann von **Bioverbundwerkstoffen** gesprochen werden.

In Frage kommende Naturfasern sind:

- **Flachs**  
auch als **Lein** bezeichnet; Faserlein (im Gegensatz zu Öllein) ergibt feine Fasern mit hoher Zugfestigkeit
- Sisal
- **Hanf**  
landwirtschaftlich angebauter Nutzhanf ist nicht zu verwechseln mit Drogen; Fasern sind leichter und kostengünstiger als Glasfasern und biologisch abbaubar; erste Versuche im Karosseriebau
- Jute
- Ramie (Zellulosefasern)
- Banane
- Kokos

**Türverkleidung** als Beispiel für den Einsatz von **Flachs und Sisal im Fahrzeugbau**

Vorteile:

- ca. 25% leichter als herkömmliche Werkstoffe; damit ergibt sich für 4 Türinnenverkleidungen eine Gewichtsersparnis von 1...2 kg.
- hochelastisch, splitterfrei, feuerfest
- Schall absorbierend (durch lockere Struktur der Fasern)
- Einsatzbereich von  $-30...+105$  °C
- Recyclbar
- Keine gesundheitsgefährdenden Substanzen emittiert („Fogging“-Effekt)

Verarbeitung:

- Flachs/Sisal-Mischung ohne Zusätze zu 2 cm Vlies verarbeitet
- Zuschnitte mit Harz tränken, aufheizen auf 160 °C und pressen/verformen
- Mit Folie versehen (Dekorfolie aus Polyolefin)
- Keine Abrasion (Abrieb) an verarbeitenden Maschinen/Werkzeugen (im Vergleich zu Glas- und Kohlenstofffaserverarbeitung)
- Sehr gut verformbar (Tiefenverformung)

## **Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe**

### **Spritzguss**

Spritzguss ist ein Kunststoffverarbeitungsverfahren, analog dem Druckguss bei Metallen: Rieselfähiges Thermoplastgranulat (auch Pulver) wird in einem Zylinder (Extruder) erwärmt und das plastifizierte Material dann unter Druck durch eine Düse in ein mehrteiliges, gekühltes Spritzgusswerkzeug hineingespritzt (durch Translation des Zylinders), wo es erstarrt. Danach wird das Werkzeug geöffnet und das Werkstück mit dem Anguss ausgeworfen.

Analog dazu funktioniert der nicht so verbreitete Spritzguss von Duroplasten, nur das hier das Werkzeug beheizt ist, in dem dann das Formteil aushärtet.

Es handelt sich somit um ein taktweises Urformverfahren.

Besondere Bedeutung erlangt das Verfahren durch die Möglichkeit bei kurzer Taktzeit einbaufertige Produkte oder Produkte mit geringer Nacharbeit zu erzeugen einschließlich multifunktionaler Eigenschaften wie Schnappverbindungen, Filmscharniere, Materialkombinationen (hart/weich, Kunststoff/Metall).

### **Spritzgussmaterialien**

Vorwiegend werden Thermoplaste verarbeitet. Duroplaste sind ebenfalls möglich, aber im Spritzguss nicht so verbreitet.

### **Spritzgussmaschinen**

Spritzgießmaschinen bestehen aus Spritzeinheit und Schließeinheit. Die Werkzeugträgerplatten nehmen dann die eigentlichen Spritzgusswerkzeuge auf, in deren Formhohlräumen das plastifizierte Material hineingespritzt wird.

### **Spritzgusswerkzeuge**

Spritzgusswerkzeuge sind hohen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Da diese Werkzeuge kostenintensiv sind, ist eine hohe Stückzahl (als Richtwert: 50.000 bis 250.000 Zyklen/Jahr) erforderlich, die von unterschiedlichen Faktoren abhängig ist.

## Gestaltungsrichtlinien

### Entformungsschrägen (Formteilneigungen)

Die in Entformungsrichtung liegenden Innen- und Außenflächen müssen zur einfachen und zerstörungsfreien Entformung mit Neigungen versehen werden. Dies trifft auch auf Durchbrüche, Aussparungen, Rippen, Augen, Nuten u. Ä. zu sowie formgebende Elemente senkrecht zur Entformungsrichtung bspw. in Seitenteilen, beweglichen Backen u. Ä.

Die Größe des Neigungswinkels ist von mehreren Faktoren abhängig (Formmasse und deren Schwindung, Art der Fertigung, Formteilgestaltung).

In der Regel beträgt der **Neigungswinkel 30° bis 3°**.

### Radien (Mindestradien)

Die plastifizierte Formmasse muss sich beim Einspritzen in der Form verteilen und dabei den Fließwiderstand überwinden. Dies wird erleichtert durch Radien, wodurch auch gleichzeitig der Werkzeugverschleiß verringert wird. Weitere Vorteile: Vermeidung von Fließmarkierungen auf der Oberfläche, geringere Eigenspannungen und Spannungsspitzen sowie daraus resultierender Verzug im Formteil, einfachere Werkzeugfertigung.

Die Bemessung der Mindestradien ist von verschiedenen Faktoren abhängig: Werkstoff, Füllstoffe, Fließverhalten, Kerbempfindlichkeit.

In der Regel beträgt der **Mindestradius 0,6 mm bis > 3 mm**.

Dabei ist  $R_a \sim R_i + s$ .

Zur Erhöhung der Steifigkeit kastenförmiger Teile können Kanten und Ecken durch Wandverdickungen abgerundet werden (dabei gilt das Gesagte zu Wanddickendifferenzen weiter unten).

### Hinterschnitte

Spritzgussformen sind mindestens zweiteilig, damit sie geöffnet werden können und das erstarrte Werkstück entformt bzw. ausgeworfen werden kann. Es dürfen demzufolge in Entformungsrichtung keine Hinterschnitte sein, die dies verhindern. Ausnahmen basieren auf der Dehnbarkeit des Werkstoffs bei der Entformung.

Der einfachste und kostengünstigste Weg ist, durch geeignete konstruktiv-gestalterische Maßnahmen Hinterschnitte „aufzulösen“.

Beispiel Kaffeetassenhenkel.

Andernfalls muss es im Werkzeug Seitenteile, Schieber und bewegliche Backen geben. Dies erhöht die Kosten, den Verschleiß, die Störanfälligkeit und kann zum verstärkten Abzeichnen von Formteilungsebenen auf dem Werkstück führen.

## Wanddicken (Wandstärken)

Wanddicken sollten aus Gewichtsgründen minimal sein, wobei jedoch die Formteilgeometrie bei Belastung ausreichend steif sein muss (bspw. durch konstruktive Maßnahmen wie Rippen und Wölbungen). Wanddicken sind auch im Zusammenhang mit dem Fließweg zu sehen: Für einen längeren Weg der plastifizierten Formmasse im Spritzgusswerkzeug sind größere Wandstärken notwendig.

Wandstärke s [mm]	Fließweg l [mm]
1	40
2	100
3	200
4	350

Im Extremfall (bspw. sehr dünnwandige Verpackungen aus PS, PE, PP) kann das Verhältnis bis auf 1:250 steigen.

Das Wanddicken-Fließweg-Verhältnis ist auch abhängig vom Angussystem, dem Werkstoff (PMMA und PVC-H nicht unter 1 mm Wandstärke) und den darin enthaltenen Füllstoffen. Es ergeben sich spezifische Diagramme mit optimalen Bereichen und Grenzbereichen.

## Wanddickendifferenzen

Ungleichmäßige Wandstärken führen zu ungleichmäßigem Abkühlen und somit zu inneren Spannungen und sogar zu Rissen, zu Verformungen/Verzug und Einfallstellen. Sie sind deshalb zu vermeiden oder zu minimieren, z. B. durch geeignete konstruktiv-gestalterische Maßnahmen wie Rippen.

In der Regel sollte die **maximale Wandstärke höchstens das 1,2...1,3 fache der normalen Wandstärke betragen** ( $s_1 = 1,2s \dots 1,3s$ ).

## Versteifungen

Wie oben erwähnt, sollten Steifigkeit und Festigkeit nicht durch zusätzliche Wandstärke erzielt werden.

Besser geeignet sind Rippen, Wölbungen und Profilierungen.

- Rippen sind ebenfalls mit Neigungen und Radien zu versehen. Sie können jedoch ebenso wie Wandanschlüsse an der (meist glatten) Gegenseite Einfallstellen verursachen und bei großflächigen Teilen das Fließverhalten behindern.
- Wölbungen (konkav oder konvex) erhöhen die Gestaltfestigkeit. Sie können auch verwendet werden, um nach dem Abkühlungsprozess und der damit verbundenen Schwindung plane Flächen zu erhalten.
- Profilierungen sind beim Spritzguss üblich zur Steifigkeitserhöhung und werden als Stufenbildungen realisiert.
- Eine überlegte Randgestaltung z. B. durch Profilierungen sorgt für Steifigkeit ohne Materialanhäufung und Hinterschneidungen und den damit verbundenen Folgen

## Werkstoffe/Fertigung – Kunststoffe

### Blasverfahren

Hohlkörper werden meist im Blasverfahren hergestellt. Im Gegensatz zum Spritzguß ist der Kopfdurchmesser kleiner als der Basisdurchmesser bzw. es entstehen Teile die eigentlich keine Öffnung haben. Im Wesentlichen lassen sich zwei Gruppen entsprechend des Vorstadiums unterscheiden: Spritzblasen und Extrusionsblasen.

#### Spritzblasen

Bei Spritzblasen wird ein Vorformling spritzgegossen, der z.B. die Form eines Reagenzglases mit Außengewinde am Kopf hat. In einem Karussell wird dieser in die nächste Station geschwenkt und dort in einer Form mit einem größeren Volumen aufgeblasen, d.h. an die Werkzeugwandung gedrückt. Ergebnis ist eine Flasche o.ä. mit einem Schraubkopf. Diese besitzt keine Quetschnähte und ist z.B. für die Befüllung mit kohlenstoffhaltigen Flüssigkeiten geeignet.

#### Extrusionsblasen

Ein schlauchartiger Vorformling wird frei nach unten in das geöffnete Blaswerkzeug extrudiert. Dieses fährt zusammen und quetscht den Schlauch ab. Die über eine Düse zugeführte Luft drückt dann das Material an die Werkzeugwandung. Entstehende Reste (Butzen) werden abgetrennt und wieder dem Prozess zugeführt.

### Extrusion (Strangpressen)

Neben dem Spritzguß ist die Extrusion ein weit verbreitetes Verfahren in der Kunststoffverarbeitung. Im Extruder (mit Schnecke oder Doppelschnecke) wird das Granulat plastifiziert und durch ein profiliertes Werkzeug (Düse) kontinuierlich ins Freie gedrückt, wo es kalibriert, abgekühlt und geschnitten wird.

#### Extrusionsgruppen

Die Austrittsdüse kann sehr unterschiedlich sein

- Profilierte Düse zur Profilherstellung
- Breitschlitzdüse zur Herstellung von Folien und Platten
- Schrägspritzkopf- und Ummantelungsdüse zur Kabelummantelung
- Düse mit Dorn zur Herstellung von Hohlprofilen (Rohren)
- Mehrlochköpfe für Borsten und Fäden
- Folienblasköpfe

### Werkstoffe

Außer klassischen (ggf. speziell darauf ausgerichteten) Thermoplasten lassen sich auch Elastomere extrudieren.